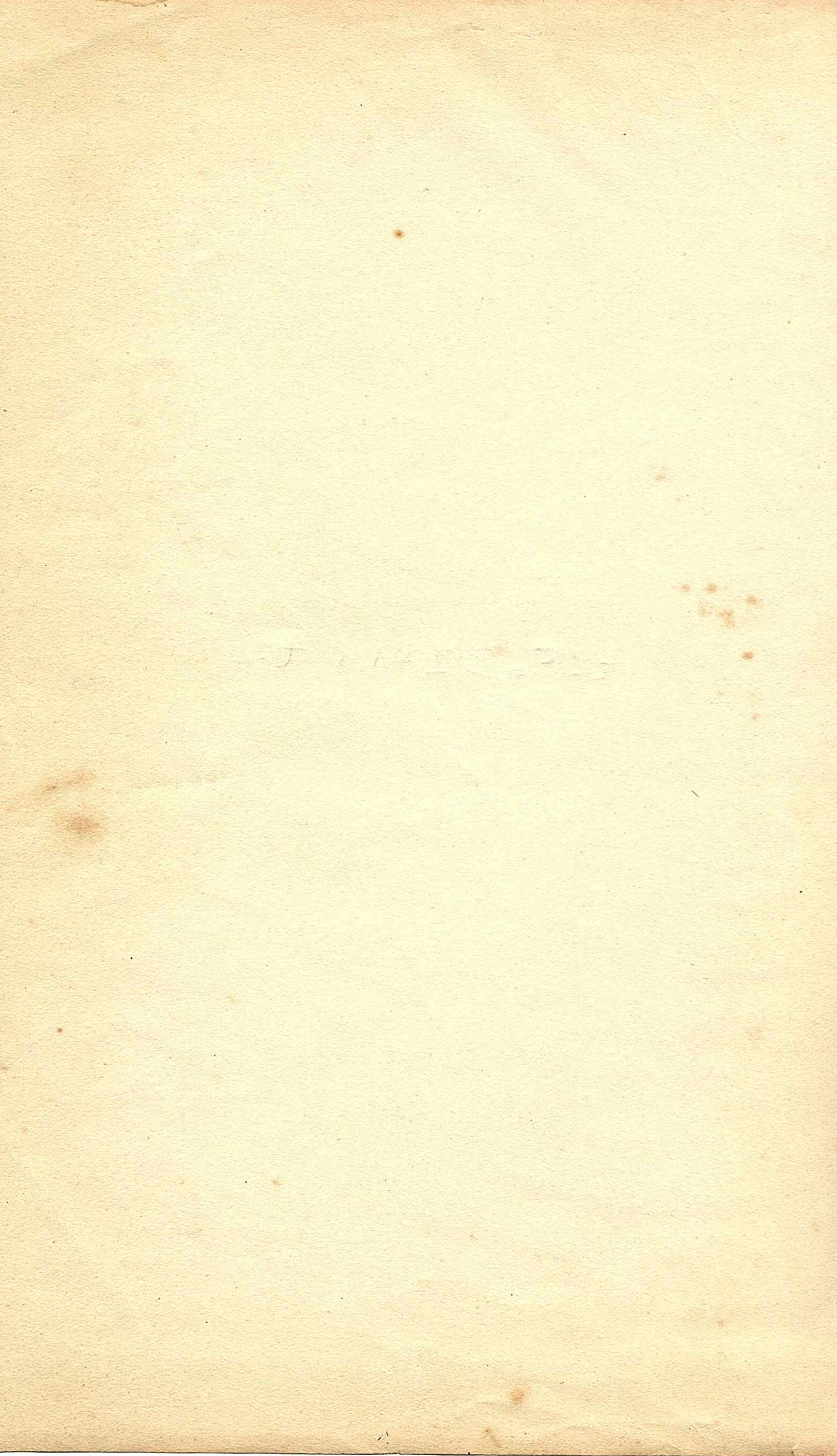
UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA
FACULTAD DE INGENIERIA

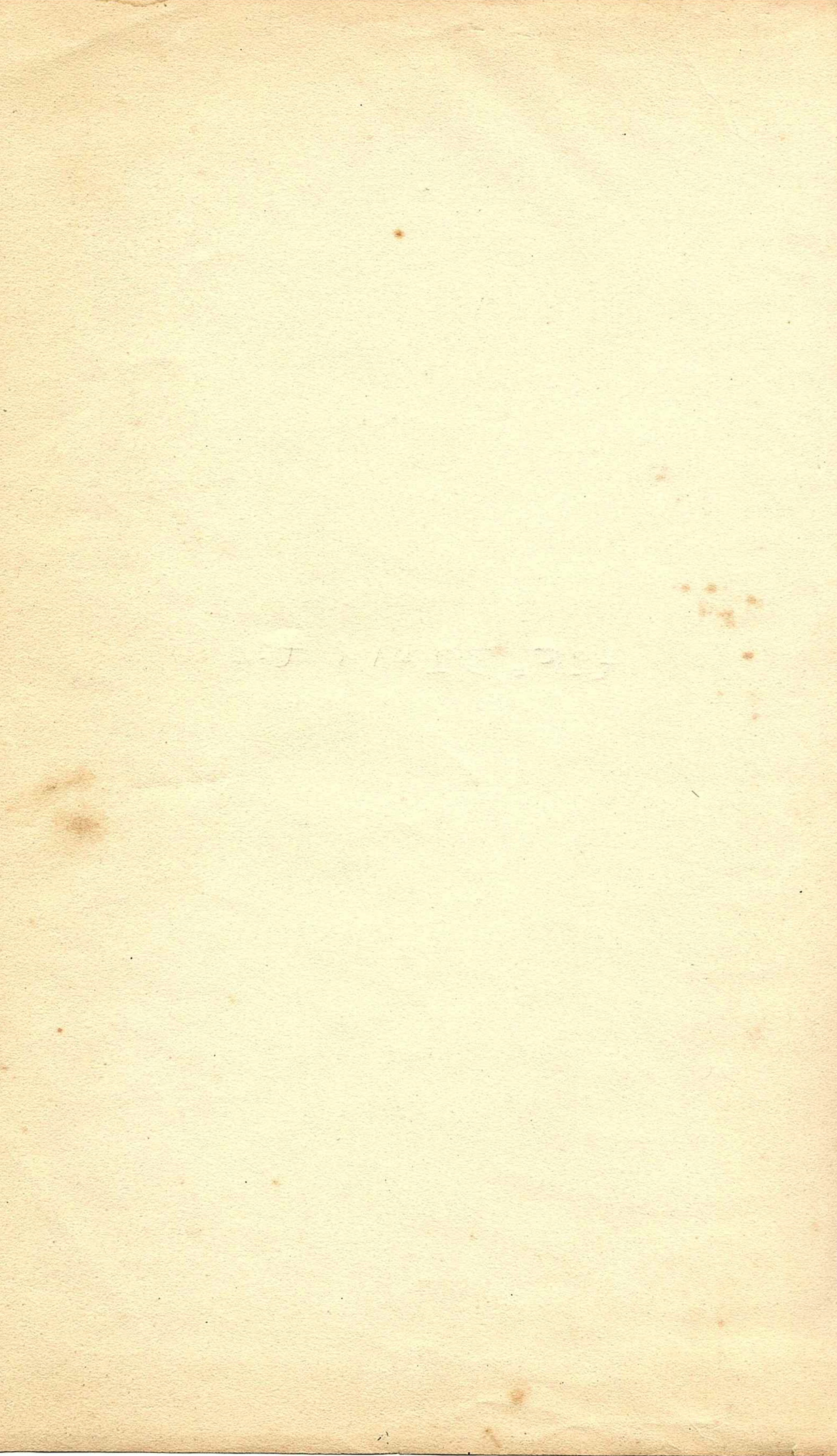
PUBLICACIONES DIDACTICAS

CURSO DE ENSAYO DE MATERIALES

Prof. Ing. VICENTE I. GARCIA
Director del Instituto de Ensayo de Materiales

MONTEVIDEO
1948





CURSO
DE
ENSAYO DE MATERIALES

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Publicaciones didácticas

CURSO DE ENSAYO DE MATERIALES

Prof. Ing. VICENTE I. GARCIA
Director del Instituto de Ensayo de Materiales

MONTEVIDEO
1948

PREFACIO

Este libro no es más que una síntesis de las lecciones sobre el ensayo de los materiales de construcción, dictadas en el aula respectiva de la Facultad de Ingeniería. No tiene otro propósito que suministrar a los alumnos, los conocimientos fundamentales que les habilite para emprender, tan pronto como sea posible, la parte práctica del curso. Es deseable, en efecto, que dediquen la mayor parte del tiempo destinado a esta asignatura, a trabajar activamente en los laboratorios del Instituto de Ensayo de Materiales.

Considero, como ya lo he manifestado en otra oportunidad, que la tarea más provechosa, tanto del Profesor como de los alumnos, debe desarrollarse durante la ejecución de las experiencias, ensayos o investigaciones. Es allí, frente a la realidad, cuando puede hacerse un detenido examen de las máquinas, aparatos o instrumentos utilizados, discutir las teorías o hipótesis admitidas, analizar los factores que influyen sobre los resultados y deducir cuanta conclusión pueda ofrecer algún interés.

Por otra parte, el trabajo del alumno no debe limitarse a la ejecución de un número más o menos grande de experiencias. Su intervención tiene que ser mucho más intensa. Debe anotar todos los datos obtenidos y redactar luego una monografía de cada uno de los trabajos realizados. Se propende, de esta manera, a desarrollar el espíritu de observación estimulando el afán por la investigación científica en todos aquellos que se sientan con vocación para una tarea tan útil como proficua en satisfacciones morales.

Creo además, que debe facilitarse el trabajo del alumno, sin alejarlo de las fuentes originales. Es indispensable que acuda a ellas cada vez que tenga que profundizar el estudio de un tema determinado.

Ensayo de Materiales

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES

Definiciones. — La determinación de las formas y dimensiones que debe darse a cada uno de los elementos constitutivos de una máquina o de una estructura sometida a la acción de fuerzas exteriores conocidas, para que los esfuerzos no excedan en ningún punto de ciertos límites preestablecidos, requiere un estudio en parte racional y en parte experimental. Racional en cuanto se refiere al cálculo de los esfuerzos y a la forma de las piezas o elementos constitutivos; experimental en lo que atañe a la determinación de las propiedades particulares de los materiales y la subsiguiente fijación de las dimensiones de las secciones. El estudio experimental de los materiales de construcción es el objeto principal de este curso, y comprende la investigación de las propiedades mecánicas, tecnológicas y físicas de cada material, para hacer posible la resolución de la siguientes cuestiones:

a) Determinación de los coeficientes de trabajo aplicables en la práctica, para que los esfuerzos internos, desarrollados bajo la acción de las cargas, fijas o accidentales, estáticas o dinámicas, no comprometan en ningún caso la resistencia o la estabilidad de las construcciones.

b) Determinación de los procedimientos destinados a verificar de manera rápida, segura, exacta y económica, si los materiales satisfacen las condiciones que hubiesen sido prescriptas. En otros términos, los ensayos que deben preceder a su recibo o a su rechazo.

El ensayo de los materiales — El ensayo de un material puede hacerse con fines científicos o con fines simplemente prácticos.

En el primer caso es indispensable *obtener dentro de las condiciones en que se ejecute los ensayos, el mayor grado de exactitud que sea posible.* (IV Congreso de la Asociación Internacional para el ensayo de los materiales, reunido en Bruxelas, del 3 al 6 de Setiembre de 1906).

Las máquinas, aparatos o instrumentos empleados en este tipo de ensayos, deben ser de la mayor precisión. El operador, por su parte, además de poseer una preparación suficiente, debe proceder con el mayor cuidado para que los resultados que obtenga no se hallen influídos por errores, que desvirtuarían completamente el carácter del ensayo.

Los ensayos con fines prácticos, llamados generalmente *ensayos corrientes*, deben ajustarse a otras condiciones. Tienen que ser, principalmente, de ejecución sencilla y en cuanto sea posible independiente de la habilidad del operador, como medio de que puedan efectuarse con la máxima frecuencia, al permitir emplear el trabajo de un mayor número de operadores.

En los ensayos corrientes y en lo que a la precisión de las máquinas y a la indicación de los resultados se refiere, no se irá más allá de los límites compatibles con los defectos e imperfecciones inherentes a los materiales ensayados.

En general se considera suficiente una aproximación del uno al dos por ciento.

Existe conveniencia en que se agregue a los resultados de los ensayos indicaciones completas sobre la naturaleza del material, su procedencia o fabricación, sobre el tratamiento del ejemplar, anterior al ensayo; es preciso además indicar, en cuanto sea posible, todas las propiedades mecánicas, físicas, microscópicas y químicas.

También debe indicarse en las memorias del ensayo, de una manera tan completa como sea posible, los aparatos empleados y los métodos seguidos, para permitir la comparación de los resultados y la apreciación de su valor, es decir, su grado de precisión. (Congreso de Bruxelas - 1906).

Ensayos mecánicos. — El fin de estos ensayos es la determinación de la resistencia que oponen los materiales a la acción de las fuerzas exteriores y la medida de las deformaciones experimentadas por los mismos a consecuencia de la acción de dichas fuerzas.

Las fuerzas exteriores pueden actuar en distintas formas y desarrollar esfuerzos de distinta naturaleza. Los ensayos correspondientes se clasifican en ensayos por acción gradual, por acción instantánea o por choque, y por acción repetida o por fatiga.

Cada uno de estos tipos de ensayo puede a su vez dividirse en en-

sayos a la extensión, a la compresión, a la flexión, a la torsión y al corte.

Los materiales deben ensayarse en primer término según la naturaleza de los esfuerzos a que se encontrarán sometidos en su aplicación. (Congreso de Bruxelas - 1906).

El comportamiento de los materiales bajo la acción de las fuerzas aplicadas, varía de acuerdo con su naturaleza.

Así, por ejemplo, un cubo de granito, un cilindro de hormigón, etc., sometidos a un esfuerzo de compresión, resistirán a la acción de la carga, con muy pequeñas deformaciones, — solamente apreciables con instrumentos de gran precisión — hasta que ésta alcanza cierto límite, en cuyo punto se producirá de pronto la rotura, generalmente en forma brusca y estrepitosa. En cambio, si sometemos una barra de acero dulce a un esfuerzo de extensión, observamos casi de inmediato y a simple vista, un alargamiento en la longitud de la barra, a la vez que una reducción de la sección transversal. Si se continúa aumentando la carga se llegará a la rotura. Poniendo entonces en contacto los dos trozos de la barra y midiendo su longitud, comprobaremos un alargamiento considerable. Para las longitudes usuales de las barras de ensayo ese aumento oscila alrededor de un 30 %.

Deformaciones elásticas y deformaciones permanentes. — Deformaciones elásticas son aquellas que desaparecen conjuntamente con la causa que las produjo.

En el caso de una barra metálica, si se suspende la experiencia, anulando la carga, antes de que el esfuerzo haya alcanzado cierto límite, — variable con la naturaleza del material — observaremos que el alargamiento producido bajo la acción de la fuerza desaparecerá conjuntamente con ésta, y la barra recuperará su longitud primitiva. Este límite es llamado *límite de elasticidad* y el período durante el cual las deformaciones desaparecen con la carga: *período elástico.* Ahora bien; si la carga sigue aumentando más allá del límite de elasticidad, aunque sin llegar a la rotura, se observará, al descargar el cuerpo, que no desaparece toda la deformación producida, sino que conserva un alargamiento de carácter estable. A esta deformación se le da el nombre de *deformación permanente.*

No existe ningún cuerpo que sea perfectamente elástico. La elasticidad perfecta es una ficción, ha dicho acertadamente H. Le Chatelier. Las deformaciones producidas durante el período elástico no

desaparecen totalmente, en general, al descargarse el cuerpo. Sin embargo, como esas deformaciones que subsisten luego de desaparecer las cargas que no han superado el límite de elasticidad son pequeñísimas, si se les compara con las deformaciones elásticas, y mucho menores aun si se les compara con las deformaciones permanentes producidas fuera del período elástico, se ha optado por no tenerlas en cuenta.

En el caso de un ensayo a la compresión se observará los mismos resultados pero con distinto signo; en lugar de alargamiento habrá acortamiento; en lugar de contracción transversal, aumento de sección.

Elasticidad subsiguiente. — Los ensayos mecánicos por acción gradual se ejecutan haciendo actuar sobre el cuerpo, según la dirección de uno de sus ejes de simetría y sin que se produzcan oscilaciones, una carga de valor inicial cero que se va aumentando hasta alcanzar un máximo, variable con la clase de investigación de que se trate. El aumento puede hacerse en más o menos tiempo. Los resultados no serán iguales si el ensayo dura segundos, minutos, horas o días.

Cuando se trata de los metales generalmente empleados en la construcción, la velocidad del ensayo debe ser moderada, pues de otro modo su influencia sería apreciable. (Congreso de Bruxelas - 1906).

Para las barras de acero, ensayadas a la extensión, se ha convenido en que la duración normal del ensayo puede variar entre 10 y 20 minutos, según sea la superficie de la sección.

La resistencia de un material resulta aumentada y las deformaciones disminuídas cuando se aumenta la velocidad del ensayo. Se ha observado, que si la carga aumenta con demasiada rapidez, no se produce de inmediato toda la deformación que se habría producido si ese aumento se hubiera hecho lentamente. Martens ha enunciado las dos leyes siguientes, relativas a este fenómeno, que se denomina de *elasticidad subsiguiente o de retardo en la acción del esfuerzo.*

1.°) Si se abandona el ejemplar a sí mismo luego de haber sido cargado, su longitud varía, bajo la infuencia de esta carga, durante segundos, minutos, días y aún semanas.

2.°) Del mismo modo, cuando se descarga un ejemplar y se le abandona a sí mismo, su longitud varía con el tiempo.

La velocidad ejerce también influencia en los ensayos por choque y en los de fatiga.

Período proporcional. — Los materiales, en general, además del

período elástico, tienen otro caracterizado por el hecho de que durante él, las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos. Se denomina *período proporcional* y la tensión máxima correspondiente es el *límite proporcional*. Este principio es conocido con el nombre de *Ley de Hooke*. Su descubrimiento fué hecho por este investigador antes de 1678. (R. Hooke — Sic tensio ut vis — De potentia restitutiva). La experiencia demuestra, no obstante, que la ley de Hooke no se cumple, en general, en una forma absolutamente rigurosa.

Ley de invariabilidad de volúmenes. — Cualquiera que sea la deformación sufrida por un cuerpo compacto, bajo la acción de un esfuerzo exterior, su volumen permanece constante.

Esta ley tampoco se cumple estrictamente. Se ha observado, por diferentes investigadores, diferencias hasta de 1 %.

Ensayos tecnológicos. — Para que un material pueda ser utilizado sin inconvenientes es preciso que posea una serie de propiedades, que le permitan recibir las formas requeridas por las distintas partes de una estructura o de una máquina y soportar debidamente los esfuerzos a que se hallará sometido.

A esta serie de propiedades se les denomina propiedades tecnológicas y a los ensayos respectivos *ensayos tecnológicos*.

Las operaciones necesarias para poner a los materiales en condiciones de ser empleados pueden clasificarse en los cuatro grupos que se enumeran a continuación:

a) *Por separación.* — Se refiere a lo que es preciso hacer para dividir en varias partes un trozo único. La operación puede realizarse con cuñas, tijeras sierras, máquinas de perforar, etc.

b) *Por transformación* de un cuerpo, sin separación. — Los procedimientos correspondientes son los relativos al empleo de laminadores e hileras, el forjado, el modelado, etc.

c) *Por combinación* o sea la reunión de partes de un mismo o de distintos materiales. Se refiere a las soldaduras de cualquier clase que sean; al empleo de materiales adherentes como cementos, colas, etc.

d) *Por agregación*, o sea cuando es indispensable agregar otra materia que se elimina después de efectuada la operación deseada. Es lo que ocurre en el moldeo de arcillas con el agregado de agua, que desaparece luego por evaporación.

Los ensayos tecnológicos más frecuentes son: plegado, forjado, fragilidad, dureza, adherencia, desgaste, etc.

Los ensayos tecnológicos son en general cualitativos, a diferencia de los ensayos mecánicos que son cuantitativos.

Ensayos físicos. — El objeto de los ensayos físicos es la determinación de ciertas propiedades características de los materiales, tales como el peso específico, la densidad aparente, la porosidad, la composición granulométrica, la permeabilidad, etc.

Estos ensayos no tienen siempre el carácter fundamental de los ensayos mecánicos y de los ensayos tecnológicos; no obstante en algunas circunstancias tienen un especial interés.

Ensayos microscópicos. — El examen de las fracturas como medio de juzgar ciertas propiedades relacionadas con la estructura interna de los metales es un procedimiento conocido de antiguo. Sin embargo, hasta la introducción del microscopio en esta clase de estudios, los progresos alcanzados fueron muy relativos. Puede afirmarse que gracias al examen microscópico han podido revelarse muchos fenómenos relacionados con los tratamientos térmicos de los metales y con las variaciones consiguientes de la estructura de sus componentes.

En la actualidad estos estudios se han constituído en una nueva ciencia: la metalografía microscópica, de la que se han recogido muchas enseñanzas y de la que es dable esperar aún grandes adelantos.

Los procedimientos metalográficos permiten no sólo determinar las proporciones de los componentes químicos de una aleación, sino además su constitución interna, es decir la forma en que se encuentran agrupados o combinados.

Osmond, en un informe presentado en Octubre de 1892 a la Comisión Francesa de Métodos de Ensayo de los Materiales de Construcción, ya manifestaba, refiriéndose a esta nueva ciencia: "transformación positiva en el arte de interpretar el aspecto de las fracturas, la metalografía será desde luego descriptiva, determinará para los distintos metales, en sus diferentes estados, la naturaleza, forma y dimensiones, proporciones, distribución local y general de los componentes".

"Más tarde, en posesión de datos experimentales suficientes relacionará los hechos observados:

1.°) Con sus causas; investigando como cambia la estructura de un metal bajo la influencia de estos tres factores combinados: temperatura, tiempo y presión.

2.°) Con sus consecuencias; definiendo las propiedades mecánicas que corresponden a una determinada estructura".

A su vez Hiorns, en su interesante libro sobre la materia, ha dicho: "Tan pronto como el microscopio hizo su aparición en nuestras grandes usinas, los químicos industriales y los expertos se apresuraron a servirse de este nuevo sistema de investigación".

"Es necesario, no obstante, reconocer que el examen microscópico no debe reemplazar al análisis químico ni a los ensayos mecánicos de los metales; su único fin es suministrar datos complementarios que los otros métodos empleados son incapaces de dar. Así, para el acero, el análisis químico ordinario indicará la cantidad total de carbono combinado y libre, pero no revelará la presencia de componentes definidos, tales como la ferrita, la cementita, la perlita, la martensita, etc., ni la forma en que están distribuídos en el metal. Del mismo modo, en una aleación como el latón el análisis químico dará las cantidades relativas de cobre y de zinc, pero no indicará como existen estos metales, si en estado libre o en estado combinado".

"El análisis químico no puede revelarnos la estructura interna, cristalina u otra que modifica tan grandemente las propiedades físicas del metal; no indicará tampoco la presencia o la ausencia de mezclas eutécticas. Es verdad que algunas de estas propiedades pueden ser evidenciadas por otros medios, pero también aquí el microscopio es de gran utilidad porque ayuda a confirmar los resultados de esos otros procedimientos físicos".

La semejanza que existe desde ciertos puntos de vista, entre la metalografía y la petrografía, explica el empleo frecuente de términos técnicos similares.

Ensayos químicos. — El conocimiento de la composición química de los materiales presenta en muchos casos un gran interés.

Es bien conocida la influencia que la más pequeña variación en la proporción de algunos de los componentes de un cuerpo puede ejercer sobre todas sus propiedades mecánicas y tecnológicas. Como ejemplo evidente, puede mencionarse el grupo hierro-carbono, en el que pequeños aumentos o disminuciones en el porcentaje de carbono, da por resultado la obtención de aleaciones con propiedades tan dispares como las que caracterizan a las fundiciones y a los aceros.

Entre los ensayos químicos tienen especial importancia los de corrosión, es decir la resistencia a la acción de ácidos, de la humedad, etc.

Importancia del ensayo de los materiales. — Es indiscutible la importancia que tiene para el ingeniero, — sea cual fuere la especia-

lidad a que se dedique — el conocimiento completo de las propiedades de los materiales de construcción y de las teorías, procedimientos o métodos seguidos para el ensayo de los mismos. Sea actuando en el carácter de director de obras, al establecer las condiciones y forma en que ha de procederse al recibo o rechazo de los materiales y al redactar los respectivos pliegos de condiciones; sea como empresario o como industrial, estudiando los medios de fabricación más ventajosos para obtener dentro de un mínimo de costo productos de la mejor calidad que sea posible; ya como proyectista, disponiendo las distintas partes de una obra, en forma que permita utilizar con el máximo aprovechamiento, los materiales de que pueda disponerse en cada localidad dentro de las condiciones más favorables.

Puede afirmarse que no habrá situación alguna ocupada por un ingeniero — durante su vida profesional — que no le ponga frente a problemas para cuya resolución le será indispensable conocer los procedimientos adoptados en el estudio de las propiedades de los materiales, los ensayos más convenientes en cada caso y los resultados obtenidos en las experiencias que efectúan constantemente los laboratorios.

Por las mismas razones, es imprescindible también que existan ingenieros dedicados exclusivamente al ensayo de los materiales, especialistas en esta rama de la ingeniería, cuyo desarrollo ha sido extraordinario en los últimos tiempos.

Es interesante recordar la opinión del eminente sabio norteamericano, iniciador en América de esta clase de estudios, Carlos B. Dudley, fallecido el 21 de Diciembre de 1909, después de haberse dedicado con una actividad realmente fecunda, durante los últimos 34 años de su vida, al ensayo de los materiales y a raíz de haber sido electo por unanimidad de votos, en el Congreso realizado en Copenhague, para presidir la Asociación Internacional de Ensayo de Materiales y por consiguiente el Congreso de Nueva York (1912), distinción que significaba el digno coronamiento de una vida consagrada por entero al ensayo de los materiales.

Dudley manifestó— en un notable discurso sobre el "Ingeniero especialista en ensayos" (1906) — que estos técnicos deben ser tenidos como un "factor nuevo en la vida técnica y comercial y que a ellos les estará reservado siempre un papel prominente en el desarrollo de la civilización". A estos ingenieros corresponden funciones distintas se-

gún sea el fin perseguido en sus trabajos. Se puede distinguir así los investigadores, los asesores y los árbitros. El investigador es el hombre de ciencia independiente, el experimentador libremente entregado al descubrimiento de la verdad. El asesor es un técnico que actúa al lado del productor en salvaguarda de sus intereses o al servicio del consumidor, velando por la ejecución rigurosa de los contratos con el productor, o lo que es igual, por el fiel cumplimiento de los pliegos de condiciones. El árbitro debe resolver los conflictos que se suscitan a veces entre el productor y el consumidor, determinando la mejor forma de solucionar las diferencias, que es generalmente la ejecución de experiencias o de ensayos especiales que permitan dilucidar claramente los puntos sometidos a su fallo.

Unificación de los métodos de ensayo. — Tan pronto como se reconoció la necesidad de instituir con carácter permanente el servicio de ensayo de materiales, creando al efecto, en todos los países, Institutos y Laboratorios dedicados especialmente a esa tarea se planteó el problema de conseguir que sean de inmediato comparables entre sí los resultados obtenidos para un mismo material, no importa en que laboratorio ni por que experimentador.

Era necesario, para ello, fijar en forma clara, concisa, y que no originara dudas ni vacilaciones de especie alguna, las normas a que deberían ajustarse estrictamente todos los laboratorios. Solamente así podría establecerse comparaciones exactas entre los resultados alcanzados en laboratorios distintos o aun dentro de un mismo laboratorio por operadores diferentes.

La primera iniciativa, a este respecto, fué tomada por Bauschinger, quien consiguió reunir a los especialistas más competentes en la materia, en cuatro conferencias sucesivas que se realizaron en Munich (1884), en Dresde (1886), en Berlín (1890) y en Viena (1893).

En este año, 1893, al fallecer Bauschinger, recogió la iniciativa Tetmajer, quien logró en 1895 la fundación de la "Asociación Internacional para el ensayo de los materiales", para continuar la tarea brillantemente comenzada. La primera presidencia de la Asociación fué confiada a Tetmajer.

Patrocinados por la misma Asociación se reunieron Congresos Internacionales en Zurich (1895), en Stokolmo (1897), en Budapest (1901), en Bruxelas (1906), en Copenhague (1909) y en Nueva York (1912).

En 1904 debió reunirse un Congreso en San Petersburgo pero tuvo que ser suspendido a causa de la guerra ruso-japonesa.

El VII Congreso debió reunirse en 1915 en Petrogrado pero fué suspendido también a causa de la primera guerra europea.

En Setiembre de 1927 se reunió en Amsterdam un Congreso Internacional en el que después de un amplio cambio de ideas respecto a la posibilidad de renovar las relaciones internacionales en lo que se refiere a esta materia, se acordó constituir la "Nueva Asociación Internacional para el ensayo de los materiales", la cual tomaría a su cargo la organización periódica de Congresos Internacionales. De acuerdo con los Estatutos respectivos, el fin de la Nueva Asociación es asegurar la colaboración internacional para cambiar ideas sobre los resultados de investigaciones y sobre todos los conocimientos concernientes al ensayo de materiales. Al efecto organizará Congresos dentro de períodos variables entre tres y cinco años. Las cuestiones relativas a la racionalización de los materiales no estarán comprendidas en su esfera de acción.

Organizados por la Nueva Asociación se reunieron Congresos en Zurich (1931) y en Londres (1937).

La palabra "Nueva" de la denominación adoptada en Amsterdam fué suprimida con anterioridad al Congreso de Londres por resolución del Comité Permanente, votada en la sesión del 17 de Abril del mismo año.

El Congreso siguiente debió reunirse el año 1940, en Berlín. Desgraciadamente, como en 1915, la segunda guerra europea vino a interrumpir otra vez la importante tarea que la "Asociación Internacional de Ensayo de Materiales" había tomado a su cargo y que se hallaba ya en pleno desarrollo.

Al mismo tiempo que la Asociación Internacional, mediante una acción coordinada e intensa, ha llegado a concretar muchos métodos y procedimientos de ensayo que han sido casi universalmente adoptados, otras instituciones, unas de carácter internacional y otras nacionales, han contribuído también de manera eficaz al progreso de esta materia.

De las primeras, merece ser especialmente mencionada la International Standards Association. Entre los muchos problemas importantes resueltos por ella, figura el de los ensayos de fragilidad. Estos ensayos, que motivaron en el pasado un sinnúmero de investigaciones y publicaciones y que originaron algunas enojosas discusiones, fueron de-

finitivamente resueltos, con la aprobación de la gran mayoría de los países europeos en las reuniones celebradas por el Comité 17 — Hierro y Acero, en las sesiones celebradas en Dusseldorf (Enero de 1933) y en Budapest (Setiembre de 1936). En esas reuniones quedaron establecidas las normas relativas a las máquinas de ensayo y al ejemplar tipo.

De las instituciones nacionales hay que citar en primer término a la American Society for Testing Materials de los Estados Unidos de la América del Norte, cuya labor tesonera puesta de relieve en las reuniones que celebra anualmente es bien conocida de todos. Debemos mencional también la British Engineering Standards Association de Gran Bretaña, que ha hecho publicaciones de gran interés. En la América del Sur existen el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, el Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, la Associação Brasileira de Normas Técnicas, etc.

Debemos recordar además, el Congreso de Ensayo de Materiales reunido en París en 1900, presidido por Picard y auspiciado por la Asociación Francesa de Ensayo de Materiales, que votó algunas conclusiones de importancia.

El Congreso Internacional reunido en Bruxelas en 1906 fué uno de los más proficuos, pues votó conclusiones que señalaron normas definitivas para el ensayo de gran número de materiales, las que en su mayoría siguen aplicándose en la actualidad. Su Comité Director, al publicar el informe dando cuenta de la labor realizada, se expresó en los siguientes términos: "El presente trabajo es el primer fruto de esta íntima colaboración internacional llevada a cabo conforme al pensamiento de sus fundadores. Los métodos recomendados aquí, han sido casi totalmente elaborados por Comisiones Internacionales; son presentados como el resultado de un acuerdo, después de una libre discusión entre los especialistas más distinguidos, sobre la elección de los procedimientos considerados en la actualidad como los mejores y más generalmente aceptados.

"Este resultado es mucho más interesante si se tiene presente que la Asociación no se ha reducido a tratar la unificación de los métodos de ensayo sino que se ha impuesto también como tarea, la de mejorar los métodos y las investigaciones sobre los materiales. Notables trabajos se han publicado en este orden de ideas durante los últimos años.

Hemos creído útil incluir textualmente, en este libro, las princi-

pales conclusiones votadas en los Congresos Internacionales, con indicación expresa de su procedencia. Consideramos que esta transcripción puede ser de utilidad porque al dar a conocer la norma de ensayo, facilita también el medio de ampliar su estudio o de aclarar alguna duda que pudiera suscitarse, con el examen de los antecedentes o discusiones habidas al respecto.

Toma de muestras y preparación de los ejemplares para ser ensayados. — La manera de proceder en cuanto se relaciona con la extracción de las muestras de los materiales y con la preparación de los ejemplares para ser adaptados a las formas y dimensiones en que deban ser ensayados tiene una importancia fundamental.

Es menester que las muestras permitan juzgar fundadamente sobre la calidad y condiciones de toda la partida de materiales cuya recepción o rechazo debe resolverse. Para ello hay que asegurarse, por los medios más eficaces a que se pueda recurrir, de que las muestras tomadas responden — dentro de lo posible — al promedio general de todo el material que constituye la partida. *En general, cuando se trate de extraer ejemplares de una pieza, se elegirá de preferencia la región de la misma en que la cualidad que se quiere verificar tenga más importancia en servicio, o sobre todo allí donde deje probablemente más que desear.* (Congreso de Bruxelas - 1906).

Es indispensable también que al preparar los materiales para colocarlos en condiciones de ser sometidos a los ensayos que en cada caso corresponda, no se haga sufrir al material ningún esfuerzo, trabajo o deformación, que pueda tener como consecuencia la variación de alguna de sus propiedades, ya que ello haría incurrir en errores que perjudicarían al proveedor de los materiales o a la resistencia y la seguridad de la obra a que estén destinados.

Por consiguiente es absolutamente necesario que tanto la persona que tenga a su cargo la recepción de los materiales como la que deba extraer las muestras y la que tenga que preparar los ejemplares, ajusten todos sus actos a normas fijas e invariables establecidas de antemano teniendo en cuenta lo recien indicado.

Entre nosotros estas normas están contenidas en las especificaciones que aprueba, después de un amplio estudio en el que intervienen todas las partes interesadas, el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas. Será suficiente, en consecuencia, proceder siempre de acuerdo con dichas normas.

Antes hicimos notar la necesidad y conveniencia que existe en llegar a la completa unificación de los métodos de ensayo, ya que es el único medio para conseguir que sean comparables los resultados de ensayos efectuados en distintos laboratorios o por diferentes experimentadores. Exactamente lo mismo puede decirse con respecto al método establecido para la toma de muestras y para la preparación de los ejemplares destinados a ser ensayados.

Por vía de ejemplo transcribiremos a continuación algunas normas relativas a la toma y preparación de muestras de cementos, de metales, de piedras y de maderas.

Cemento Portland — El Instituto Uruguayo de Normas Técnicas en su norma 20-P, aprobada por decreto del Ministerio de Obras Públicas de fecha 23 de Noviembre de 1945, ha establecido que: "Las muestras de cementos destinadas a los ensayos físicos, mecánicos y químicos, deben extraerse en presencia de los interesados cuando estos lo exijan.

Las muestras pueden ser individuales o compuestas, según se establezca en cada caso, y su peso no ser menor de 10 kilos. Se entenderá por muestra individual la que se extrae de una sola vez. Se entenderá por muestra compuesta una mezcla, lo más homogénea posible, de muestras individuales.

Cada muestra de ensayo no debe corresponder a más de 1600 sacos de cemento, salvo que otra cosa estuviera especialmente especificada por quien exige el ensayo.

Si las muestras se extraen en la fábrica, se apartan de la ensacadora 10 kgs. de cemento por cada 1600 sacos o fracción; esta cantidad puede retirarse en una sola vez o en varias veces. En el último caso se mezclan cuidadosamente varias porciones de peso semejante, (alrededor de 500 gramos) tomadas a intervalos regulares; cada porción debe corresponder aproximadamente a 40 sacos.

Cuando las muestras se extraen de camiones, bodegas, depósitos, etc., debe retirarse una muestra compuesta por cada 1600 sacos o fracción. A este efecto se divide la partida en lotes de 40 sacos cada uno y se extrae una muestra de un saco cualquiera de cada lote. Terminada la extracción, las muestras parciales se mezclan íntimamente, para formar la muestra compuesta correspondiente.

Cuando las muestras se extraen de vagones de ferrocarril se pro-

cede en la forma descripta, pero en ningún caso una muestra compuesta debe corresponder a más de un vagón.

Cuando las muestras se extraen de camiones que transportan el cemento directamente desde la fábrica, se pueden retirar muestras de distintos camiones y formar con ellas las muestras compuestas, cada una de las cuales no debe corresponder a más de 1600 sacos.

Cuando las muestras se extraen de transportes a granel se sacan de diversos puntos convenientemente distribuídos. Inmediatamente después de su extracción las muestras se colocan en envases impermeables de cierre hermético, en los que se hace constar la fecha en que han sido extraídas. A solicitud de algunos de los interesados pueden precintarse los cierres de los envases y firmarse por las personas responsables de la operación.

Antes de iniciarse los ensayos cada muestra se mezcla íntimamente y luego se tamiza con el tamiz U. N. I. T. 840 (véase capítulo XIV) con el objeto de deshacer los grumos y separar las sustancias extrañas. Se reúnen después las muestras en grupos, a los efectos de preparar con ellas muestras compuestas; cada grupo debe corresponder al número de sacos exigidos por el ensayo o los ensayos a efectuarse con la muestra compuesta respectiva, según se indicará luego.

La muestra compuesta se forma tomando porciones similares de cada una de las muestras que entran en su composición. La muestra compuesta así obtenida deberá mezclarse cuidadosamente antes de su empleo.

Los ensayos físicos requeridos deben efectuarse sobre cada una de las muestras extraídas de vagones y camiones, excepto en el caso de que sean los utilizados para transportar el cemento directamente desde la fábrica.

Los ensayos físicos que se realicen sobre muestras provenientes de depósitos, bodegas de barcos y otros lugares de almacenaje en gran escala, deberán referirse a las siguientes cantidades de cemento inspeccionado:

Tiempo de fraguado, cada muestra debe corresponder a 1600 sacos.

Ensayo de resistencia, muestra compuesta correspondiente a 3200 sacos.

Ensayo de expansión, muestra correspondiente a 8000 sacos.

Las determinaciones químicas que se realicen sobre muestras provenientes de depósitos, bodegas de barcos y otros lugares de almace-

naje en gran escala, deberán referirse a las siguientes cantidades de cemento inspeccionado:

Todas las determinaciones químicas especificadas con excepción de SO_3 muestra compuesta correspondiente a 1600 sacos.

Dosificación de anhidrido sulfúrico (SO_3), muestra compuesta correspondiente a 3200 sacos.

Cuando el número total de sacos inspeccionados sea menor que el especificado en algunos de los casos que se acaba de indicar, los respectivos ensayos físicos y químicos se realizan sobre la muestra correspondiente a la cantidad inspeccionada".

Metales. — En el Congreso de Bruxelas (1906) se aprobaron las siguientes normas relativas a las muestras y ejemplares de ensayo de hierros y aceros dulces laminados y forjados.

"Los ejemplares deben ser, por regla general, extraídos en frío y en lo posible con ayuda de herramientas cortantes de manera que se evite la producción de deformaciones.

Si los ejemplares debieran ser extraídos de piezas curvas o si ellos se hubiesen deformado durante el corte con la tijera, conviene enderezarlos en frío, sea en una prensa, sea por medio de martillos de cobre cuando el material no deba ser calentado. En caso contrario calentándolos a una temperatura que no pase del rojo cereza.

Si los ejemplares han sido cortados con tijeras, cortadoras o punzones, conviene que en cada ejemplar se quite, dentro de la longitud útil y de cada lado, por lo menos cinco milímetros de metal, empleando al efecto instrumentos cortantes tales como cepillos, fresas, etc.

No se debe, a menos de convención previa, efectuar el recocido de los ejemplares. Este tratamiento se ejecutará calentando la pieza a unos 800°C y dejándola enfriar lentamente. Siempre que sea posible el material debe conservar la costra de laminado.

En los palastros cortados se sacará las muestras en el sentido del largo y del ancho de los dos lados. En los palastros no cortados (palastros brutos) se sacará de los restos o de los dos extremos. En estos últimos ,se desechará siempre que sea posible, el borde bruto en un ancho no menor de 30 mm.

Cuando se trate— en el caso de palastros trabajados o ya usados— de determinar las propiedades que tenían antes de su empleo, los ejemplares deberán ser extraídos de las partes del palastro en que el espesor no hubiera sido modificado y que hayan quedado lo más rectas posible.

En los casos en que no se pudiera conseguir más que piezas de formas curvas, se sacará el ejemplar con taladro, buril o sierra circular. Los ejemplares deberán ser luego, cuidadosamente enderezados de acuerdo con las indicaciones anteriores.

En el ensayo de fundiciones los ejemplares serán preparados en el torno".

Los ensayos de piezas de cobre deben ejecutarse, según lo acordado en dicho Congreso, ajustándose a las siguientes indicaciones:

"Los ejemplares serán sacados en frío utilizando con tal objeto útiles cortantes. Se evitará, en lo posible, enderezarlos después de esa operación. En todo caso, el enderezamiento debe ser ejecutado, con todas las precauciones posibles, con martillos de madera o de cobre.

La preparación de los ejemplares ejerce gran influencia sobre los resultados. La operación final debe hacerse con las mayores precauciones y el trabajo tiene que ejecutarse sin interrupción sobre toda la longitud útil del ejemplar; el espesor de las últimas virutas debe ser muy pequeño.

Los ejemplares deben ser limados en el sentido longitudinal y pulidos con papel esmeril. Los bordes, en los de sección rectangular deben ser un poco redondeados".

Piedras naturales. — En lo relativo a la toma de muestras y preparación de ejemplares de ensayo de las piedras vamos a mencionar las normas votadas el 8 de Julio de 1900 por la Comisión designada por el Gobierno Francés, para el estudio de los métodos más convenientes para el ensayo de los materiales.

Las prescripciones fundamentales contenidas en dichas normas son las siguientes:

"Las muestras de piedras de construcción que se remitan a un laboratorio de ensayo deberán ser acompañadas por un informe en que se hará constar el nombre comercial de la piedra, la cantera y el banco de donde fué extraída. Se agregará, siempre que sea posible, un corte de la cantera que represente la ubicación y el espesor de los bancos y los puntos de donde se sacaron las muestras. Se indicará también la formación geológica a que pertenezca la cantera. Se expresará además el empleo a que se destina la piedra.

Las muestras serán simplemente desbastadas en forma de prismas rectangulares que tengan no menos de treinta centímetros de lado y una altura igual a la de los bancos de donde hayan sido extraídas. Si

la altura del banco fuera demasiado grande se sacarán muestras de diferentes alturas del mismo. La dirección del lecho de cantera debe ser señalada en cada muestra.

Los ejemplares de ensayo serán preparados en el laboratorio con la ayuda de la sierra o del hilo, a fin de evitar la producción de fisuras que podrían pasar inadvertidas.

Los ejemplares pueden ensayarse en estado seco y en estado de imbibición, total o parcial. En todos los casos se indicará en los certificados el grado de imbibición, medido por la comparación entre los pesos en estado seco y en el estado de imbibición en que se encontraba al ser ensayado."

Piedras artificiales — "Los procedimientos indicados para las piedras naturales regirán también, en lo que sean aplicables, al ensayo de las piedras artificiales.

Las muestras de hormigones o morteros en servicio, deberán ser acompañadas con los siguientes datos:

a) — La naturaleza del cemento empleado.
b) — La naturaleza de la arena y su composición granulométrica.
c) — La naturaleza del agregado grueso.
d) — Las proporciones de los componentes.
e) — La naturaleza del agua de amasado.
f) — La edad".

Materiales cerámicos — "Los ensayos de productos cerámicos deben hacerse siempre sobre los artículos puestos en venta.

Si se desea conocer con la mayor exactitud el valor de una fabricación, conviene operar sobre muestras de distinto grado de cocción. Es suficiente muchas veces examinar las muestras más débilmente cocidas, que se reconocen fácilmente en el aspecto y más particularmente en su menor dureza, y en que las dimensiones de las piezas son algo mayores que la mediana.

Debe indicarse la marca comercial del producto, su forma, el estado de las aristas y superficie, color, etc."

Maderas — Todo lo referente al ensayo de maderas fué detenidamente especificado en el Congreso de Bruxelas. En lo que se refiere a la toma de muestras y preparación de ejemplares se votaron las siguientes conclusiones:

"Datos sobre el origen de la madera.

Para juzgar las propiedades técnicas de las maderas es necesario poseer los datos siguientes:

1.° — Indicación del lugar de procedencia del tronco.

2.° — Calidad del suelo: Buena, Media, Inferior o Mala.

3.° — Clase de vegetación: Aislada, Esparcida, Compacta.

En la elección de troncos para ensayos de vegetaciones compactas o casi compactas se tomará como representantes los troncos medios entre los doscientos más vigorosos. Cuando no pueda hacerse esta elección, se debe tomar, para los ensayos, el tipo dominante, es decir troncos cuyo desarrollo esté de acuerdo con la edad y que tengan una forma de tronco y de copa normal, que respondan a la media de los mejores ejemplares del conjunto.

4.° — Las condiciones de crecimiento caracterizadas por:

a) El cociente:

$$\frac{S}{d} = \frac{\text{diámetro a la mitad de la altura del tronco}}{\text{diámetro a m. 1.3 sobre el suelo}}$$

b) La proporción de la copa: (longitud total del tronco, longitud de la copa y diámetro máximo de la misma).

c) Modo de crecimiento.

d) El crecimiento durante los primeros tiempos.

e) El modo de cultivo.

5.° — La edad determinada por el número de capas anuales en la sección de la base del tronco.

6.° — La fecha del corte. Indicación del año, mes y día.

7.° — Los medios de conservación y secado de la madera desde el momento del corte hasta el ensayo.

8.° — La posición en el tronco de la pieza a ensayar.

Signos exteriores de la madera

En cada pieza que se ensaye es necesario indicar:

1.° — Según el aspecto del corte longitudinal o de la superficie hendida:

a) La dirección de las fibras: rectas o curvas.

b) El número, clase y repartición de los nudos.

2.° — Según el aspecto de la sección transversal:

a) El espesor radial medio de las capas anuales.

b) El ancho, de 30 en 30 capas anuales, empezando por la ca-

pa exterior, a los efectos de tener la medida media correspondiente a períodos de crecimiento de igual duración.

c) La longitud de las capas anuales, determinada sobre un centímetro cuadrado de sección, con ayuda de una pequeña rodaja graduada.

d) El modo de formación de las capas anuales: circulares o excéntricas.

e) Para las coníferas: la relación entre los espesores medios de las capas de madera, correspondientes al fin del otoño y a la primavera. En los ensayos muy numerosos puede prescindirse de este dato, pues el peso de la madera informa aproximadamente sobre este punto.

Toma de ejemplares a diferentes alturas del tronco — Cuando se extraiga ejemplares a diferentes alturas del tronco se tratará de que los restos de madera puedan ser utilizados. La elección de la altura de toma de las muestras está determinada por el fin del ensayo.

Para la comprobación de las propiedades medias de los troncos se procederá en la forma siguiente: Para los ensayos de flexión se tomarán los ejemplares entre los 7 y 10 metros de la altura del tronco, contados desde el suelo. Para otros ensayos los ejemplares se tomarán inmediatamente arriba o abajo de los ejemplares destinados a los ensayos de flexión.

Para la determinación de sí los troncos pueden emplearse en la confección de vigas de longitudes dadas, se tratará de que el eje de los ejemplares para el ensayo de flexión coincida con el de las vigas que se utilizarán en la práctica; los otros ejemplares se tomarán, como en el caso anterior, a ambos extremos de los ejemplares de flexión.

Para la investigación de la influencia de la posición en el tronco, la sección más baja destinada a la determinación de la resistencia a la compresión y la del peso debe encontrarse situada a m. 1.3 sobre el terreno. Las otras piezas de ensayo se tomarán a 1, 5, 11, 17 metros, y así sucesivamente de 6 en 6 metros sobre el corte de la base, hasta que el diámetro del tronco sea inferior a 13 cm,

Se indicará la posición en el tronco de todas las piezas que se ensaye y siendo posible también la de los trozos aislados.

Para que las propiedades medias de una madera de procedencia determinada puedan ser establecidas es necesario hacer ensayos sobre tres troncos por lo menos."

[illegible] de todas la partida [illegible]
[illegible]
[illegible] de las capas [illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]
[illegible]

Para las coníferas la relación entre las [illegible] de las capas de madera, correspondientes al fin del otoño y a la primavera [illegible] el peso [illegible] sobre este punto.

[illegible] a diferentes alturas del tronco [illegible] de diferentes alturas del tronco se [illegible] de que los restos de madera puedan ser utilizados. La elección de la altura de [illegible] de las muestras está determinada por el fin del ensayo.

Para la comprobación de las propiedades medias de los troncos se procederá en la forma siguiente: Para los ensayos de [illegible] se [illegible] entre los 7 y [illegible] metros de la altura del tronco, [illegible] Para otros [illegible] los ensayos [illegible] de los ejemplares [illegible] a los ensayos de flexión.

Para la determinación de si los troncos pueden emplearse en la [illegible] de los ejemplares para el ensayo de flexión [illegible] de las vigas que [illegible] los otros [illegible] el caso anterior [illegible] de los ejemplares de flexión.

Para la investigación de la influencia de la posición en el tronco [illegible] a la determinación de la resistencia a la compresión [illegible] cm.

[illegible] de todas las piezas [illegible]

Para que las propiedades medias de una madera de procedencia determinada puedan ser calificadas es necesario hacer ensayos sobre tres troncos por lo menos.

CAPITULO II

LAS MAQUINAS DE ENSAYO

Principios generales — Las máquinas destinadas a la ejecución de los ensayos de los materiales de construcción, deben estar dispuestos de manera tal, que permitan aplicar al cuerpo que se ensaya, únicamente el esfuerzo cuyo efecto se trata de investigar. Es indispensable por consiguiente que se elimine, en cuanto sea ello posible, la producción de cualquier clase de esfuerzo secundario.

Si no se procediese así, sería fácil incurrir en errores de importancia, además de que se complicaría inútilmente las condiciones de la experiencia si se pretendiese evaluar con alguna exactitud la influencia ejercida por dichas acciones secundarias, lo que por otra parte no sería siempre de posible realización.

Clasificación — Las máquinas de ensayo pueden dividirse en tres grandes grupos:

1.° — Máquinas para ensayos por acción gradual. Corresponden a todos aquellos ensayos en que partiendo de un valor inicial nulo, se aumenta lentamente el valor del esfuerzo hasta alcanzar un máximo determinado por las condiciones de la experiencia.

2.° — Máquinas para ensayos por acción instantánea o por acción dinámica, más comúnmente denominados ensayos por choque. Son aquellos en que la fuerza es aplicada bruscamente, alcanzando por lo tanto su efecto total en un espacio mínimo de tiempo, en general fracciones de segundo.

3.° — Máquinas para ensayos por acción repetida o ensayos de fatiga. En este tipo de ensayo el cuerpo es sometido a esfuerzos relativamente pequeños, pero que se repiten un gran número de veces, en general del orden de los millones.

MAQUINAS PARA ENSAYOS POR ACCION GRADUAL

Condiciones y constitución — *Estas máquinas deben ser cons-*

truídas de manera que funcionen normalmente sin choques. (Congreso de Bruxelas - 1906).

En toda máquina para esta clase de ensayos se puede distinguir cuatro partes perfectamente determinadas. Son las siguientes: dispositivo productor del esfuerzo; aparatos para la medida del esfuerzo; bastidor de la máquina; e instrumentos para la medida de las deformaciones producidas en los ejemplares sometidos a ensayo.

Dispositivo productor del esfuerzo — Puede estar formado por un sistema de palancas, por un tornillo sin fin, por una prensa hidráulica, etc.

Como ejemplo del primer caso se puede citar la conocida máquina de Michäelis, representada esquemáticamente en la fig. 1, utilizada en

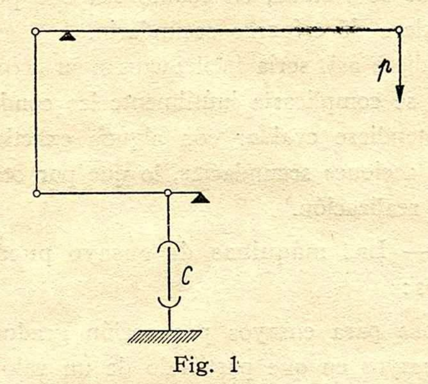


Fig. 1

los ensayos mecánicos de extensión y flexión de cementos y morteros.

Una carga p, que puede aumentarse gradualmente produce un esfuerzo P sobre el cuerpo sometido a ensayo C. Siendo conocida e invariable la relación entre las longitudes de los brazos de las dos palancas de que está formada la máquina, no presenta dificultad alguna la determinación de la relación existente entre el esfuerzo P y la carga aplicada p.

Como un ejemplo de máquinas accionadas por tornillos sin fin podemos citar, entre las que integran las instalaciones del Instituto de Ensayo de Materiales, la máquina Amsler de torsión, varias máquinas de extensión para alambres, correas, papeles, tejidos, etc.

Las prensas hidráulicas son, no obstante, las más utilizadas. Pueden verse en la mayor parte de las máquinas para ensayos a la extensión, compresión, flexión, corte, etc.

Aparatos para la medida del esfuerzo — Los aparatos destina-

dos a evaluar la magnitud del esfuerzo aplicado al cuerpo, pueden agruparse en dos series. La primera está constituída por aquellos en que la apreciación se hace periódicamente, es decir, con ciertas intermitencias impuestas por el propio funcionamiento del aparato. La segunda por los que permiten que la medida se haga de una manera contínua, sin interrupciones, de manera tal que en todo instante puede ser evaluado sin necesidad de manipulación especial alguna.

Como aparatos de la primera serie se puede citar la balanzas de palanca, con o sin dispositivos auxiliares, y las balanzas de peso móvil cuando éste es movido a mano.

La segunda serie comprende las balanzas de inclinación o manómetro de péndulo, las balanzas de resorte, los dinamómetros hidrostáticos y los manómetros de resorte.

Balanzas de palanca. — La relación entre las longitudes de los brazos a y b es constante; la fuerza p con que debe equilibrarse el esfuerzo aplicado P para obtener su valor, es variable.

Los pesos auxiliares para incrementar el valor de p, hasta obtener la posición de equilibrio, que corresponde a la igualdad de momentos:

$$Pa = pb$$

son agregados a mano, por el experimentador.

Balanza de palanca con dispositivo especial. — La relación de los brazos es constante, también en estos casos. El peso p se integra con una serie de discos perforados en su centro. Estos discos pueden ser agregados sucesivamente mediante una instalación mecánica, lo que hace posible que el valor de p aumente gradualmente, de una manera casi contínua.

Este aparato tiene la ventaja de hacer posible que los pesos sean agregados sin choques y sin que se produzca por consiguiente ninguna sacudida ni vibración. Evita también que se incurra en errores al calcular el total de pesos aplicados en el extremo del brazo b. Pero, para no complicar demasiado el aparato y aumentar el grado de aproximación del valor del esfuerzo, es necesario que sea posible agregar a mano los pequeños pesos complementarios que sean precisos.

Balanzas con pesos constantes movibles. — En este aparato a y p son constantes y b es variable. El peso p es movido a mano a lo largo del brazo b. En algunos casos el peso p es movido automáticamente por

la misma máquina, de manera que la palanca permanece constantemente en equilibrio. En tales condiciones el funcionamiento resulta contínuo y el aparato debe ser incluído, en consecuencia, entre los correspondientes a la segunda serie.

Balanza de inclinación o manómetro de péndulo. — En esta balanza, representada esquemáticamente en la fig. 2, p es constante; a_1 y b_1 son variables, si llamamos así a las proyecciones sobre un eje horizon-

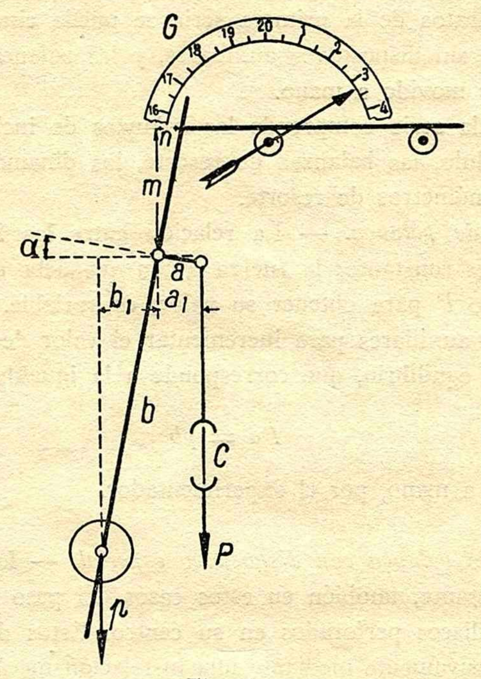


Fig. 2

tal de los brazos de longitud constante a y b. Se puede establecer las siguientes igualdades:

$$Pa_1 = pb_1$$

$$a_1 = a \cos \alpha$$

$$b_1 = b \operatorname{sen} \alpha$$

$$P = p \frac{b_1}{a_1} = \frac{b}{a} \operatorname{tang} \alpha$$

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{n}{m}$$

$$P = n \left(\frac{pb}{ma} \right)$$

llamando B a la cantidad entre paréntesis, que es de valor constante, tendremos finalmente:

$$P = nB$$

En consecuencia, la desviación lineal n producida a la distancia m del eje de giro de las palancas, expresará apreciada en la escala respectiva, el valor del esfuerzo P ejercido sobre el ejemplar.

La lectura de los esfuerzos se hace sobre la circunferencia graduada G. Aumentando convenientemente el diámetro de esta circunferencia puede facilitarse la lectura del valor de los esfuerzos y conseguir, de este modo, una mayor precisión.

Como el peso p puede ocupar diferentes posiciones a lo largo del brazo de palanca b, es posible variar la escala correspondiente y aumentar, también por este medio, la precisión del aparato, en el caso de esfuerzos de menor magnitud que la máxima admitida por la máquina de ensayo.

Balanza de resorte. — En este caso se utiliza la deformación elástica de un resorte metálico para la apreciación del esfuerzo P. La deformación del resorte se registra sobre una escala graduada que recorre un índice unido al resorte. Como medio de aumentar la precisión de las lecturas se agrega generalmente una circunferencia graduada, de diámetro apropiado, y una aguja indicadora.

La balanza de resorte es conveniente cuando se trata de medir esfuerzos relativamente pequeños. Cuando los esfuerzos son elevados es necesario emplear resortes muy fuertes, en los que las deformaciones resultan mínimas; puede incurrirse entonces en errores de cierta entidad.

Dinamómetros hidrostáticos. — La medida de P se hace sustituyendo a p por la presión de una columna líquida cuya altura, leída sobre una escala graduada, dá el valor de P.

La transmisión y la amplificación de p a P se hace casi siempre por medios hidráulicos. Al efecto, la fuerza P actúa directamente o por intermedio de palancas u otros dispositivos sobre un pistón que se mueve dentro de un cilindro que contiene un líquido, generalmente aceite, en comunicación con la columna de mercurio. La escala, convenientemente graduada, de acuerdo con los diámetros de los pistones utilizados, permite la lectura directa del valor de P.

Manómetro de resorte. — En lugar de una columna de mercurio puede usarse un manómetro de resorte.

Bastidor de la máquina — Bajo esta denominación, consideramos comprendida toda la instalación destinada a sostener los órganos utilizados para transmitir el esfuerzo que ha de aplicarse al ejemplar de ensayo.

Uno de los elementos más importantes que constituye esta parte de las máquinas de ensayo, es sin duda, el dispositivo empleado para sostener los ejemplares en forma que permita aplicar íntegramente el esfuerzo P sin que se produzca ninguna clase de esfuerzos secundarios.

El Congreso de Bruxelas votó, en lo relativo a los ensayos de extensión y compresión, las siguientes conclusiones:

Los sostenes de los ejemplares deben ser construídos de manera que los esfuerzos de extensión o de compresión se repartan tan uniformemente como sea posible sobre toda la sección del ejemplar. Para conseguir este fin es necesario: a) En los ensayos a la compresión: que uno de los dos apoyos, cuyas superficies deben ser planas y pulidas, pueda moverse fácilmente sobre un cojinete esférico; b) En los ensayos a la extensión: que la barra de ensayo tenga la movilidad mayor que sea posible, a fin de que pueda orientarse por sí misma desde el principio del ensayo. Para estos últimos ensayos esta condición puede ser satisfecha, como lo prueba la experiencia:

a) En el caso de ejemplares cilíndricos con cabezas, adoptando cojinetes esféricos que serán preferentemente de una sola pieza.

b) En el caso de ejemplares de sección rectangular, haciéndoles agujeros en los extremos por los que se hará pasar un eje cilíndrico. Es indispensable que un diámetro de estos agujeros coincida exactamente con el eje longitudinal de los ejemplares.

c) Las uniones provistas de una ranura y mordaza de cuñas, con superficies rayadas o rugosas, utilizadas en el ensayo de barras sin cabezas, producen fácilmente esfuerzos oblícuos; son, sin embargo, muy cómodas y de una exactitud que en general es suficiente en la práctica.

Instrumentos para medir las deformaciones.—Al ejecutar un ensayo, de cualquier naturaleza que sea, es indispensable medir las dimensiones primitivas del ejemplar, las variaciones de las mismas durante la experiencia y las nuevas dimensiones y forma que haya adquirido una vez terminado el ensayo.

Los instrumentos que se usan para estas medidas no forman, en realidad, una parte integrante de las máquinas de ensayo y pueden por lo mismo ser considerados, sin inconveniente alguno, como independientes de ellas. Pero, como son un complemento indispensable para la ejecución de todo ensayo, hay ventajas en que sean estudiados conjuntamente con las mismas.

Los instrumentos que se emplean para determinar las dimensiones, antes y después de efectuado el ensayo, no se diferencian entre sí. Los dispositivos que se utilizan para apreciar las variaciones durante la ejecución de la experiencia se basan en otros principios y deben ser objeto de un estudio especial.

Cuando se trata de apreciar determinada dimensión de un cuerpo se puede seguir dos métodos. El de las *medidas directas* y el de las *medidas indirectas*.

El primero consiste en colocar sobre el cuerpo una escala de medida, por ejemplo: una regla graduada provista o no de un nonio.

El segundo, en valerse de un instrumento auxiliar, por ejemplo: un compás común, para transportar a la escala de medida la dimensión tomada sobre el cuerpo.

Es evidente que se incurrirá más fácilmente en errores en el segundo caso que en el primero. Por consiguiente, siempre que ello sea posible, debe darse preferencia al procedimiento de las medidas directas.

En los ensayos corrientes basta generalmente con estimar las dimensiones con una aproximación de un décimo de milímetro. Los instrumentos más usados son las reglas graduadas, el nonio, el compás común, el micrómetro, etc.

En los ensayos científicos, la determinación de las dimensiones tiene que hacerse con mayor precisión. En muchos casos hay que apreciar micrones. Es necesario, en consecuencia, utilizar instrumentos especiales basados principalmente en el empleo de tornillos micrométricos, o en el de lentes y espejos.

Ninguna medida puede hacerse con una exactitud absoluta. Diferentes factores hacen que al determinar varias veces una misma medida, se hallen pequeñas diferencias entre los diferentes resultados obtenidos. El promedio entre todos los resultados parciales nos dará con suficiente aproximación el valor de la magnitud buscada.

Los factores a que hemos hecho referencia, como ocasionando erro-

res en la apreciación de las medidas, pueden proceder de distintas causas. Entre ellas se pueden mencionar: *errores debidos al observador*, motivados por la mayor o menor práctica y habilidad en esta clase de trabajo, por el estado de espíritu, de la vista, de los nervios, etc.; *errores de los instrumentos*, ocasionados por inexactitud en la graduación de las escalas, por el grueso de los trazos, etc.; *errores de método*, debido a haberse seguido un procedimiento equivocado o por no usar correctamente los aparatos; *errores debidos a causas exteriores*, tales como cambios de temperatura o humedad atmostérica, insuficiencia de luz o mala iluminación, posición incómoda del observador, etc. Es indudable que todas estas causas de error pueden coexistir. Pueden ser clasificadas en dos grupos. En uno de ellos estarían incluídas las que influyen siempre en un mismo sentido, sea aumentando o sea disminuyendo la magnitud medida. Como ejemplo de esta clase de errores, que se denominan *errores metódicos*, se puede citar los originados por defectos de los instrumentos, por haber seguido procedimientos equivocados, porque el observador trabaja en una posición inconveniente, etc.

En el otro grupo estarían comprendidos todos los errores que se producen indistintamente en uno u otro sentido, aumentando o disminuyendo el verdadero valor de la medida. Son los llamados *errores accidentales*. Pueden reconocer múltiples causas: variaciones de temperatura, de humedad, de luz, etc.

Los errores metódicos pueden y deben ser siempre eliminados. Cuando fueran originados por el empleo de instrumentos mal graduados y no se disponga de otros para reemplazarlos — que es lo deseable — es preciso determinar por el cálculo, las correcciones que sean necesarias, en los valores directamente hallados, para conseguir los resultados verdaderos. El empleo de procedimientos diferentes para la determinación de una misma medida permite eliminar errores metódicos debidos a otras causas.

Los errores accidentales pueden ser evitados sin mayor dificultad. Para ello es suficiente tomar un promedio de todos los resultados obtenidos al efectuar varias veces y si es posible por diferentes observadores, la apreciación de una misma magnitud. Se elimina, de este modo, todos los pequeños errores que, como hemos expresado, serán indistintivamente positivos o negativos y se disminuirá considerablemente la influencia de los errores mayores, pues estos se producirán necesariamente en proporción mínima.

Cuando en una serie cualquiera de medidas, los errores aparezcan sin seguir ningún orden determinado, es decir, cuando sean indistintivamente positivos o negativos, o sea que los valores obtenidos sean mayores o menores que el verdadero valor de la medida, puede tenerse la seguridad de que no se ha incurrido en ningún error metódico. Al decir verdadero valor de la medida, nos referimos al obtenido tomando el promedio de los resultados parciales de toda la serie de medidas. Este es, en efecto, el único medio de que disponemos para llegar a su determinación con la máxima aproximación. En cambio, cuando existieran errores metódicos, se observará en la serie de medidas, que las diferencias, sean las positivas o las negativas, se ordenan de acuerdo con una cierta ley. Hay posibilidad, por consiguiente, de saber si los resultados obtenidos al determinar una dimensión, cualquiera que ella sea, pueden ser admitidos como exactos o si por el contrario se hallan influídos por vicios que los hacen inaceptables.

Precisión de los instrumentos de medida — Una regla graduada, o un calibrador provisto de nonio, permiten apreciar sin dificultad alguna hasta el décimo de milímetro.

Otros aparatos, como el tornillo palmer, el esferómetro, etc., permiten llevar la aproximación hasta el centésimo de milímetro.

Con otros instrumentos, basados en el empleo de tornillos micrométricos, se puede tener un grado mayor de aproximación. Así, por ejemplo, un tornillo micrométrico que tenga cinco filetes por milímetro y cuyo tambor esté dividido en cien partes, podría medir con la siguiente aproximación:

$$g = \frac{1}{5 \times 100} = 2 \times 10^{-3} \text{ mm.}$$

Si se tratara de apreciar, usando este tornillo, el alargamiento de una barra de acero duro, bajo la acción de una carga de un kilogramo por milímetro cuadrado, tendríamos que operar sobre un ejemplar cuya longitud de medida L fuera lo bastante grande para que los pequeños errores de medida no influyeran demasiado sobre los resultados. Supongamos que una lectura equivalente a $5\ g$ fuera suficiente.

Llamemos l al alargamiento experimentado bajo la acción de una tensión de 1 kg/mm^2; en la longitud L deberá tenerse un alargamiento:

$$l = 5g = 5 \times 2 \times 10^{-3} = 10^{-2} \text{ mm.}$$

Considerando que para un acero duro $E = 20.000$ kg/mm.^{2}, aproximadamente, podemos escribir:

$$20.000 = \frac{L}{10^{-2}}$$

De donde resulta:

$$L = 200 \text{ mm.}$$

Esta longitud puede resultar prácticamente algo excesiva. Por otra parte, los tornillos micrométricos con un paso tan fino presentan algunos inconvenientes; su conservación en estado perfecto y la comprobación y corrección de los errores requiere demasiado tiempo.

Por tales motivos se emplea generalmente filetes mucho más gruesos, lo que obliga a aumentar proporcionalmente el valor de la tensión o el de L. Aún así, no se subsanan todas las dificultades, por cuanto los tambores de medida ocupan siempre mucho espacio, lo que dificulta su colocación sobre el ejemplar. Además, como es preciso manipular los tambores cada vez que se debe apreciar una medida, se aumenta la probabilidad de incurrir en errores.

Existen otros aparatos que hacen posible medir con más precisión las deformaciones, aun durante la ejecución del ensayo, y que ofrecen, por lo mismo, la ventaja de permitir las observaciones durante todo el desarrollo de la experiencia. Se basan estos aparatos en el empleo de rodillos y en el de espejos y anteojos.

Aparatos de rodillos — En estos instrumentos, la amplificación de las deformaciones, a los efectos de su medida, resulta de la relación existente entre el diámetro de un pequeño rodillo que, mediante diferentes dispositivos, es hecho girar por el propio ejemplar durante su deformación y la longitud de una aguja solidaria con el rodillo, cuyo extremo recorre una circunferencia graduada. Determinada la escala correspondiente, la lectura de las deformaciones se hace directamente sobre dicha circunferencia.

Como un ejemplo de aparato de rodillo nos referiremos al ideado por Bauschinger para los ensayos a la compresión. Supongamos que se trata de una máquina horizontal; sobre uno de los platos de la prensa se coloca un cuchillo y sobre el otro un soporte que sostiene el rodillo, que puede girar libremente alrededor de su eje horizontal. Apoyada sobre el cuchillo y sobre el rodillo se dispone una varilla de me-

tal o madera, sobre la que actúa una pequeña carga o resorte. Cuando se aproximan los dos platos de la prensa, a causa de la compresión del ejemplar, la varilla, a consecuencia de la resistencia opuesta por el cuchillo, hará girar el rodillo. Una aguja fijada a éste, en la prolongación de uno de sus diámetros, permite leer sobre una circunferencia guaduada el acortamiento sufrido por el ejemplar. Con este aparato es fácil apreciar hasta milésimas de milímetro.

Presenta, no obstante, el inconveniente de que las deformaciones no son medidas directamente sobre el ejemplar, como debe hacerse siempre que ello sea posible. Existe, por consiguiente, la probabilidad de cometer errores si los platos no se conservan exactamente paralelos. Es necesario, pues, verificar cuidadosamente si se ha cumplido exactamente esa condición, para hacer, en caso negativo, las correcciones debidas en los resultados obtenidos.

A pesar de tan serio inconveniente hay necesidad, muchas veces, de seguir métodos indirectos para obtener las medida de las deformaciones producidas durante el ensayo. principalmente ocurre esto en el caso de ensayos a la compresión, que deben hacerse frecuentemente sobre ejemplares relativamente pequeños. Tal circunstancia dificulta y hace imposible, a menudo, el uso de aparatos que midan directamente las deformaciones.

Se recomienda especialmente que en todos los casos se midan las deformaciones sobre dos fibras opuestas del ejemplar. Un promedio entre los dos resultados parciales compensará muchos de los errores provenientes de la falta de homogeneidad de la materia, de defectos en la colocación del aparato, etc

En caso de ensayos a la flexión puede usarse para la medida de la flecha un aparato, basado igualmente en el empleo de un rodillo, ideado también por Bauschinger.

Un hilo que se fija por uno de sus extremos a la parte de la pieza correspondientes a las fibras más extendidas, da dos vueltas alrededor de un pequeño cilindro o carrete y soporta en su otro extremo un peso que lo mantiene en tensión. Una aguja fijada al cilindro, en la dirección de uno de sus diámetros, permite leer sobre la circunferencia graduada, la medida de la flecha producida. La aguja tiene en su parte inferior un contrapeso que la mantiene vertical mientras no existen deformaciones. Basados en este mismo principio se han construído muchos aparatos de medida.

Aparatos de espejos — Bauschinger construyó también un aparato fundado en el empleo combinado de espejos y anteojos, con el objeto de poder medir exactamente las más pequeñas deformaciones producidas durante la ejecución de un ensayo. Sin embargo, los aparatos más usados actualmente son los de Martens, que ofrecen la ventaja de su más cómodo y fácil manejo.

La fig. 3 indica esquemáticamente la disposición dada a los diferentes elementos que integran este aparato, en el caso de un ensayo a la extensión. La varilla *f*, que se fija sobre el ejemplar *e* por medio de los

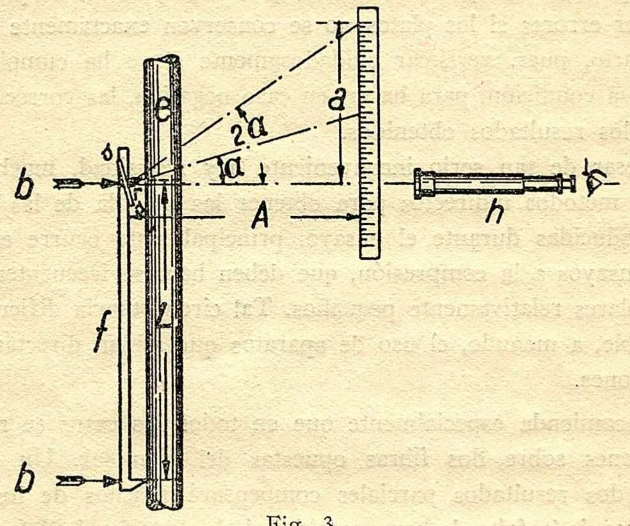


Fig. 3

resortes *b*, se apoya directamente por uno de sus extremos, de una manera invariable, y por el otro por intermedio de un cuchillo de sección rombal *r* que puede girar alrededor del punto *O* al producirse un alargamiento en la longitud de medida L_e. En dirección perpendicular al eje mayor del cuchillo *r* está colocado un pequeño espejo *ss*. Cuando el cuchillo gira alrededor de *O*, el espejo girará también el mismo ángulo, y permitirá que se lea sobre una regla graduada *M* con ayuda del anteojo *h*, una longitud *a*, que representará en determinada escala la deformación sufrida por el ejemplar.

En los aparatos Bauschinger, el cuchillo *r* está reemplazado por un pequeño rodillo que gira alrededor de su eje al producirse la deformación. El espejo está fijado según la dirección de un diámetro del rodillo.

Si llamamos r a la diagonal mayor del rombo, el alargamiento l producido en la longitud útil L_o del ejemplar, será:

$$l = L. - L._o = r \ sen \ \alpha$$

siendo α el ángulo que ha girado el eje r. La lectura a sobre la regla graduada M será — si A es la distancia entre ella y el espejo — igual a:

$$a = A \ tang. \ 2\alpha$$

Por consiguiente la amplificación obtenida será:

$$n = \frac{a}{l} = \frac{A \ tang \ 2\alpha}{r \ sen \ \alpha}$$

Como se trata de ángulos muy pequeños se puede tomar aproximadamente como valor de n:

$$n = \frac{a}{l} = \frac{2A}{r}$$

Ahora bien, como se trabaja simultáneamente con dos aparatos, se tomará como valor de a la semisuma de las dos lecturas, que llamaremos a_1 y a_2; luego:

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}$$

y por consiguiente: $$l = \frac{a_1 + a_2}{2n} = (a_1 + a_2) \frac{r}{4A}$$

En la práctica se hace generalmente $n = 500$. De manera que, si usamos un aparato en que $r = 3$ mm. y deseamos que una lectura de 1 mm. equivalga a una deformación del ejemplar igual $\frac{1}{500}$ de mm. tendríamos que colocar la regla graduada a una distancia del espejo igual a:

$$A = \frac{rn}{2} = \frac{3 \times 500}{2} = 750 \text{ mm.}$$

Se usa también aparatos de espejos para medir las flechas producidas en los ensayos de flexión y las deformaciones producidas durandurante los ensayos a la torsión.

Otros aparatos usados para la medición de las deformaciones — Además de los aparatos mencionados, existen otros basados en el empleo de pequeños y muy precisos engranajes, que resultan en la práctica muy cómodos y cuya aproximación puede llegar con facilidad hasta el milésimo de milímetro.

Entre estos aparatos pueden mencionarse los extensómetros Amsler, Riehle, etc. Los estudiantes tendrán oportunidad de utilizar tanto estos aparatos como los citados antes, durante las clases prácticas del curso.

Dispositivos pra el trazado de diagramas—Un complemento necesario de toda máquina de ensayo es el dispositivo destinado a trazar un diagrama en el que pueda registrarse la marcha de la experiencia.

Los dispositivos destinados al trazado de los diagramas correspondientes a cada tipo de ensayo deben tener, — de acuerdo con lo resuelto en el Congreso de Bruxelas, — la misma exactitud que las máquinas y los instrumentos de medida.

La manera de instalar este dispositivo varía en las diferentes máquinas de ensayo.

Por vía de ejemplo vamos a referirnos al caso de un ensayo a la extensión.

La transmisión de los alargamientos producidos en el ejemplar, se hace utilizando un cuadro metálico susceptible de alargarse. Sobre los dos lados menores de este se hallan colocadas dos piezas provistas de resortes que facilitan su montaje sobre el ejemplar de ensayo. El contacto entre el instrumento y el ejemplar se hace por intermedio de dos cuchillos que permiten localizar debidamente la longitud del ejemplar sobre la cual debe registrarse las deformaciones. Cada uno de dichos lados menores está provisto de un pequeño anillo. Un hilo que se ata a uno de estos anillos, por uno de sus extremos, y que luego pasa a través del otro anillo, va a arrollarse alrededor de una garganta situada en uno de los extremos del tambor registrador, para finalmente sostener en el otro extremo un pequeño contrapeso, destinado a mantenerlo en tensión.

Cuando el ejemplar experimente un alargamiento, el cuadro metálico hará lo mismo y en consecuencia producirá por medio del hilo,

un movimiento de rotación en el tambor. Sobre éste se fija una hoja de papel, sobre la que un lápiz, accionando directamente por el aparato registrador de los esfuerzos, se mueve en la dirección de una generatriz.

El diagrama es trazado en coordenadas ortogonales, estando generalmente representadas las deformaciones por las abscisas y las cargas por las ordenadas. En forma semejante se procede en el caso de ensayos a la compresión o a la flexión. Cuando se trata de ensayos a la torsión, se registran los momentos de torsión y los ángulos de deformación. El dispositivo para el trazado de diagramas debe hallarse colocado en forma tal que el operador pueda observar cómoda y permanentemente su funcionamiento.

Verificación de las máquinas de ensayo por acción gradual — Toda máquina de ensayo debe ser examinada periódicamente para comprobar si las indicaciones dadas por los aparatos que miden los esfuerzos y las deformaciones son las que. en realidad, corresponden. En caso negativo habría que proceder de inmediato a efectuar las correcciones necesarias para eliminar las causas de error que se hubieran producido.

Según lo resuelto en el Congreso de Bruxelas. toda instalación destinada al ensayo de materiales. debe ser construída de modo que permita una verificación fácil y segura, siendo conveniente que se compruebe con frecuencia la precisión de las máquinas y de los órganos de medida. Es necesario que los aparatos que se utilicen para verificar las máquinas y los instrumentos de medida, tengan un grado de precisión mayor que el de estos.

Para la verificación de una máquina de ensayo por acción gradual pueden seguirse diferentes procedimientos, entre los que mencionaremos los siguientes:

a) Cargando directamente los platos de la máquina con pesos conocidos. La lectura que se haga entonces en el dinamómetro debe ser equivalente al total de pesos colocados sobre el plato de la máquina.

Este procedimiento es, indudablemente, muy exacto, pero presenta el serio inconveniente de ser de difícil y hasta de imposible aplicación práctica, cuando se trata de verificar máquinas de gran potencia, que es el caso más general. En efecto, obligaría a cargar el plato de la prensa con pesos de muchas toneladas, lo que sólo podría hacerse mediante instalaciones auxiliares, con los gastos consiguientes que resul-

tarían excesivos. El uso de palancas permite en determinadas circunstancias subsanar algunos de estos inconvenientes, pero a expensas de la exactitud, a consecuencia de la intervención de los otros factores que intervienen entonces en el cálculo del valor real de la carga aplicada al plato de la prensa.

b) Empleando barras tipo, contrastadas, cuyo módulo de elasticidad sea conocido. Este procedimiento se utiliza principalmente en el caso de máquinas para ensayos de extensión. Como es preciso operar con deformaciones muy pequeñas, a fin de mantenerse dentro del período proporcional, hay que servirse — para su medida — de aparatos de gran precisión. Los aparatos de espejos llenan satisfactoriamente esta condición. Cuando la máquina funciona correctamente, la medida de las fuerzas indicadas por el dinamómetro debe coincidir con la deducida, mediante el cálculo respectivo, de las deformaciones sufridas por la barra tipo, teniendo en cuenta a tal efecto el valor conocido del módulo de elasticidad.

c) Utilizando *crushers*, o sea pequeños cilindros de cobre dulce y muy homogéneo, cuyos acortamientos bajo la acción de una carga determinada que actúa durante cierto espacio de tiempo, son conocidos.

El procedimiento de verificación consiste en comprimir uno o varios crushers entre los dos platos de la máquina durante el tiempo determinado y medir luego el acortamiento producido; se anota además la carga indicada por el dinamómetro. Como se conoce la relación existente entre la disminución de altura de los crushers y las cargas respectivas, sólo resta comparar el valor deducido de la deformación de los crushers con el indicado por el dinamómetro. El esfuerzo indicado por este debe ser igual, si la máquina funciona bien, a la suma de las cargas correspondientes al acortamiento de los crushers empleados. Este acortamiento es lo bastante grande, en las condiciones en que se efectúa la experiencia, para que su medida pueda hacerse fácilmente con un palmer. Influye sobre la exactitud del procedimiento, la temperatura y el estado de la superficie de los platos de la máquina, la colocación de los crushers, etc. A carga igual un crusher se aplasta tanto más cuanto más alta es su temperatura y cuanto más duros y pulidos se hallen los platos de la prensa. El grado de aproximación que puede alcanzarse varía alrededor de un dos por ciento.

d) Utilizando el aparato Amsler, representado en corte en la fig. 4. Está constituído por un cilindro hueco *a*, de acero, que se halla lle-

no de mercurio, cuyo grado de compresión puede medirse sobre el tubo capilar *b*. Sobre este tubo se marca un trazo de referencia *c*, al que se hace llegar el mercurio mediante el movimiento de un tornillo micrométrico *d*. La punta *e* de este tornillo al penetrar comprime el mercurio haciéndolo salir por el tubo capilar. Inversamente, si se hace girar el tornillo en el otro sentido se hace retroceder al mercurio.

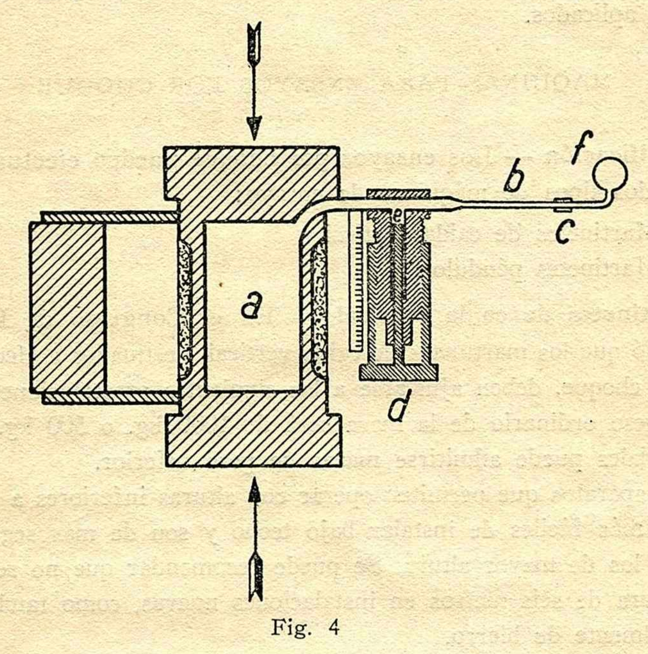


Fig. 4

Si el cilindro *a* es sometido a una fuerza de compresión, en la máquina que se trata de verificar, su volumen hueco disminuirá y como consecuencia una parte de mercurio contenido — equivalente a la disminución de volumen — saldrá al tubo capilar. Haciendo girar entonces el tornillo micrométrico podrá conseguirse que el mercurio vuelva a ocupar su posición inicial, es decir, enrasado con el índice *c*.

El ángulo que se haya hecho girar el tornillo *d* dará la medida de la disminución del volumen del cilindro y en consecuencia el valor de la fuerza aplicada, pues se conoce la relación existente entre la deformación elástica del cilindro y las cargas respectivas. Si el aparato fuera sometido a una fuerza de extensión, ocurriría un fenómeno enteramente inverso del que acabamos de describir.

Los aparatos Amsler son instrumentos ligeros, de fácil manejo, y que permiten verificar de una manera muy sencilla la exactitud de las

máquinas de ensayo. El grado de precisión obtenido es aproximadamente del uno por ciento.

Existen además otros tipos de aparatos en que la deformación elástica de una pieza metálica permite la determinación del valor de los esfuerzos aplicados.

MAQUINAS PARA ENSAYOS POR CHOQUE

Clasificación — Los ensayos por choque pueden efectuarse empleando dos tipos de máquinas de ensayo:

a) Martinetes de caída vertical

b) Martinetes péndulo.

Martinetes de caída vertical — En el Congreso de Bruxelas se resolvió que los martinetes de caída vertical, destinados a efectuar ensayos de choque, deben ajustarse a las siguientes prescripciones.

El peso ordinario de la masa será de 1000 kg. o 500 kg. En casos especiales puede admitirse mazas de peso inferior.

Los aparatos que permiten operar con alturas inferiores a seis metros son más fáciles de instalar bajo techo y son de más seguro manejo que los de mayor altura. Se puede recomendar que no se exceda dicha altura de seis metros en instalaciones nuevas, como también que sean totalmente de hierro.

Las mazas pueden ser de fundición, de acero colado o de acero forjado. El centro de gravedad de la maza debe hallarse tan bajo como sea posible. La vertical del centro de gravedad de la maza debe encontrarse situada sobre el eje de simetría de las guías.

La traza de la vertical del centro de gravedad de la maza debe ser marcada, en forma bien visible, sobre el yunque. La relación entre la parte guiada de la maza y la separación entre las dos guías debe ser superior a 2.

La caída de la maza debe ser exactamente vertical. El frotamiento durante la caída debe ser reducido al mínimo; conviene al efecto untar las guías con plombagina.

La maza debe estar provista de un dispositivo que impida toda desviación de la vertical del centro de gravedad. Debe ser fácil verificar si se cumple esta condición.

La cara de la maza que choca con el ejemplar debe tener una superficie esférica de 150 mm. de radio. Para los ensayos en que se haya

prescripto el empleo de una pieza intermedia, por ejemplo en el ensayo de llantas o de rieles, es necesario que la parte superior de la misma, que ha de recibir el golpe, sea plana. Dichas piezas deben ser ligeras.

El dispositivo de suspensión de la maza debe estar dispuesto en forma tal que no puede ejercer ninguna influencia sobre la caída libre de la maza. Es conveniente que se instale una pieza o cuña que impida la caída accidental de la maza.

El yunque debe ser de fundición, de una sola pieza, y su peso no será inferior a diez veces el peso de la maza.

La fundación o cimiento consistirá en un macizo sólido e incompresible cuya importancia variará con el espacio disponible, pero cuyo volumen debe ser, por lo menos, igual a seis veces el del yunque.

Los apoyos de los ejemplares de ensayo sobre el yunque deben estar sólidamente fijados a éste.

Es conveniente que exista una instalación destinada a evitar que los ejemplares puedan saltar de sus apoyos. Esta instalación no debe, sin embargo, ejercer influencia alguna sobre el trabajo de las piezas sometidas al choque.

La escala para medir la altura de caída debe ser móvil y estar dividida en centímetros.

Previamente a la ejecución de los ensayos debe verificarse la verticalidad de las guías y el movimiento libre de la maza.

El ejemplar debe ser colocado de manera que reciba el golpe de la parte céntrica de la cara inferior de la maza.

Al expresar los resultados de un ensayo de choque es necesario indicar el peso de la maza y la altura de la caída, pues el efecto del choque depende del valor de cada uno de estos dos factores.

La altura de caída puede medirse sin dificultad con la escala destinada a tal efecto.

Para determinar el peso últil de la maza puede seguirse el siguiente procedimiento. Se intercala entre la maza de peso conocido y el dispositivo de suspensión un dinamómetro de resorte y se lee el peso efectivo de la maza durante el descenso, que se hará con toda lentitud. Esta lectura corresponderá a la diferencia entre el peso de la maza y el rozamiento. Si se hubiera hecho ascender la maza, la lectura indicaría evidentemenet la suma del peso de la maza y el rozamiento. Cuando el rozamiento sea superior al dos por ciento, el martinete no deberá ser utilizado.

En los ensayos de choque interesa generalmente la determinación del trabajo necesario para producir la rotura del ejemplar con un solo golpe. Para evitar tanteos y la utilización de un número demasiado grande de ejemplares, tal como se hacía primitivamente, es preferible aplicar un solo choque que produzca con seguridad la rotura del ejemplar. El problema se reduce entonces a medir el trabajo excedente para determinar por diferencia el trabajo efectivo absorbido por el ejemplar hasta la rotura. Una solución — propuesta por Fremont — consiste en lo siguiente. Se mide el trabajo de la maza haciéndola caer desde diferentes alturas sobre un crusher, sobre un resorte o sobre otro dispositivo análogo. Se tiene así, una vez medida la deformación del crusher, del resorte, etc., los datos necesarios para trazar un diagrama que permitirá conocer, para cada deformación, el trabajo consumido.

Al efectuar un ensayo de extensión o de flexión por choque, por ejemplo, es posible disponer las cosas en forma tal, que la maza, después de romper el ejemplar, vaya a chocar con el crusher, el resorte o el dispositivo que se hubiera adoptado. La deformación sufrida por éstos nos indicará, de acuerdo con los datos respectivos del diagrama el trabajo excedente. Sin embargo, es más cómodo y más exacto utilizar un dispositivo de que se hallan provistos los martinetes construídos por la casa Amsler y que permiten trazar directamente el diagrama del ensayo. Dicho diagrama resulta dibujado por una punta fijada en la maza, sobre un papel arrollado sobre un cilindro vertical que gira alrededor de su eje, a una velocidad que puede determinarse fácilmente. Este cilindro puede ser movido vertical y lateralmente con el objeto de que el lápiz se encuentre a una altura conveniente del papel en el instante de producirse el choque. El movimiento giratorio del cilindro se obtiene por medio de un electro motor de 1/16 de caballo.

Si *ABC* es el diagrama obtenido (fig. 5); la parte *AB* corresponde al camino recorrido antes del choque a la velocidad v, y *BB'C* durante este

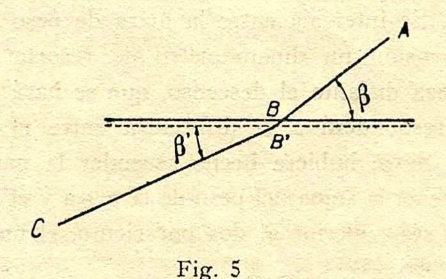


Fig. 5

y después de la rotura, siendo la velocidad final igual a v'. Las tangentes de los ángulos β' y β son proporcionales a las velocidades, es decir:

$$\frac{v'}{v} = \frac{tang\ \beta'}{tang\ \beta}$$

Si h es la altura de caída en B, h' la altura de caída después del choque, y P el peso de la maza; el trabajo A absorbido por el ejemplar será:

$$A = P\ h \left(1 - \frac{tang^2\ \beta'}{tang^2\ \beta} \right)$$

Martinete péndulo — El martinete péndulo, conocido generalmente por la denominación de péndulo Charpy, es un aparato que ofrece muchas ventajas para la ejecución rápida y precisa de los ensayos de choque. Consiste fundamentalmente en una viga metálica armada con varillas o tubos metálicos que gira exactamente en un plano vertical; articulada por uno de sus extremos a un eje horizontal y que sostiene en el otro la maza cuyo peso es de unos 18 kg.

Dos arcos de círculo colocados a uno y otro lado del pórtico que sostiene el eje horizontal sirven, respectivamente, para medir la altura de la maza antes y después del choque, es decir después de roto el ejemplar, que se coloca en el yunque en la vertical del eje y a una distancia de este igual al largo de la viga. La diferencia entre las alturas de partida y de llegada multiplicada por el peso de la maza corresponde como es evidente al trabajo absorbido por la rotura.

En algunos aparatos, como por ejemplo en el martinete péndulo Amsler, es posible leer directamente sobre una escala graduada el trabajo absorbido. Las pérdidas de trabajo originadas por resistencias pasivas pueden ser fácilmente evaluadas efectuando una serie de experiencias preliminares en vacío. Es posible así formar un cuadro donde se establece para cada altura de caída la corrección a efectuar.

Como la influencia del rozamiento es muy pequeña, la pérdida de trabajo por este concepto es, en general, inferior al 2 %. Esta pérdida puede conocerse con exactitud y por consiguiente el error resultará despreciable después de hecha la respectiva corrección.

Fuera de esta causa de error, la única que puede influir sobre

los resultados es la fuerza viva adquirida por los fragmentos del ejemplar. Esta fuerza viva es siempre muy débil y puede ser calculada fácilmente, en forma aproximada, si se admite que los fragmentos toman una velocidad igual a la velocidad restante de la maza, lo cual se aproxima mucho a la verdad. Siendo el peso del ejemplar apenas 1/50 del peso de la maza, se deduce que la fracción correspondiente a la fuerza viva será muy chica. Después de hecha la corrección, el error por este concepto es aún menor y puede considerarse con seguridad muy inferior al 1 % de la fuerza viva total. Puede decirse, en consecuencia, que la precisión obtenida es análoga a la que dan la mayor parte de los métodos de ensayo de los metales.

Durante el mes de Setiembre de 1936 se efectuó en Budapest una reunión del Comité I.S.A. — 17, en la que se reglamentó todo lo relativo a las condiciones que deben reunir los martinetes péndulos, que fueron adoptados definitivamente como máquina exclusiva para los ensayos de fragilidad.

Estas condiciones son las siguientes:

Radio de redondeado de los soportes	1 mm.
Angulo del cuchillo de la maza	30°
Radio del redondeado del cuchillo de la maza	2 mm.
Velocidad de la maza en el instante del choque	5 a 7 m/seg.

La energía disponible del péndulo será normalmente de 30 kgm. Se admitirá provisionalmente, no obstante, el empleo de péndulos de menor potencia. En tal caso los resultados obtenidos se indicarán con un índice. Por ejemplo, para los ensayos de fragilidad se escribirá K_{10} cuando se use un péndulo de 10 kgm.

MAQUINAS PARA ENSAYOS POR FATIGA

Clasificación — Existe una gran variedad de máquinas para ensayos de fatiga. Pueden ser agrupadas, de acuerdo con los diferentes tipos de ensayos, en la siguiente forma:

Máquinas para ensayos de fatiga por esfuerzos axiles.
„ „ „ „ „ „ flexión rotativa
„ „ „ „ „ „ torsión
„ „ „ „ „ „ choque
„ „ „ „ „ „ esfuerzos combinados

Máquinas para ensayos de fatiga por esfuerzos axiles — Como un ejemplo de este tipo vamos a referirnos al pulsador Amsler, aplicado a una máquina de extensión y compresión de 20 toneladas, de que dispone el Instituto de Ensayo de Materiales.

El pulsador produce variaciones periódicas de presión en el cilindro de la máquina. Los límites inferior y superior de esta presión se mantienen constantes durante todo el ensayo, ya sea permanente o elástica la deformación experimentada por el ejemplar. Los ensayos de fatiga pueden ser prolongados sin inconveniente hasta que se produzca la fractura del ejemplar o hasta que se alcance el número de solicitaciones que se hubiera prescripto. Los límites entre los cuales se puede hacer variar las solicitaciones pueden ser ajustados de antemano. Es posible fiscalizar, mediante dispositivos adecuados, la constancia de esos límites durante toda la duración del ensayo.

Las impulsiones de la carga se producen de acuerdo con una ley sinusoidal. La velocidad con que se producen las solicitaciones depende la velocidad del pulsador. Es por consiguiente fácil, obrando sobre ésta, estudiar la influencia de la frecuencia de los esfuerzos sobre la resistencia a la fatiga del material ensayado.

Un contador registra el número de ciclos completos recorridos por el pulsador y un dispositivo de contacto eléctrico lo detiene en el instante en que la deformación del ejemplar alcanza un límite determinado, o en el que se produce la rotura del mismo.

El pulsador está constituído por dos cilindros en los que se mueven émbolos animados de un movimiento alternativo producido por un mismo eje. Los dos cilindros se hallan llenos de aceite y están comunicados entre sí y con el cilindro de la máquina de ensayo.

Cuando uno de los émbolos penetra en su cilindro, impulsa el aceite contenido en éste hacia el cilindro de la máquina de ensayo y entonces el émbolo de éste se eleva ejerciendo un esfuerzo suplementario sobre el ejemplar que se encontraba ya más o menos solicitado. El valor de este esfuerzo suplementario y la deformación consiguiente dependen de la cantidad de aceite impulsada y de la sección del émbolo de la máquina. Cuando — a la semivuelta siguiente — el émbolo del pulsador es llevado por su biela hacia fuera del cilindro, la cantidad de aceite impulsado por este émbolo vuelve al pulsador, y la presión en el cilindro de la máquina disminuye y tiende hacia su valor primitivo.

Si la solicitación aplicada no hubiera producido deformaciones per-

manentes, el ejemplar recuperará entonces sus dimensiones primitivas.

Cuando avanzan conjuntamente los dos émbolos del pulsador, su acción se suma y será por consiguiente el doble de la correspondiente a cada uno de ellos. Si por lo contrario, se mueven en sentidos opuestos, el contenido de aceite de uno de los cilindros pasará al otro; en consecuencia no irá aceite al cilindro de la máquina de ensayo; su émbolo permanecerá inmóvil y el ejemplar no recibirá ninguna solicitación suplementaria. Finalmente, si uno de los émbolos del pulsador inicia su carrera saliente cuando el otro no ha terminado su carrera entrante, su acción se neutraliza parcialmente y la cantidad de aceite impulsado por el pulsador a la máquina de ensayo y devuelta luego al pulsador depende del valor del ángulo existente entre los ejes de los dos cilindros del pulsador. Este ángulo se puede modificar desviando angularmente la posición de uno de los cilindros mientras permanece fijo el otro. Esta operación se obtiene por intermedio de un mecanismo especial.

El cilindro móvil puede ocupar todas las posiciones angulares con relación al otro, desde 0° hasta 180°. Se puede, por consiguiente, hacer variar a voluntad la cantidad de aceite puesta en movimiento alternativo por el pulsador desde la suma hasta la diferencia de las capacidades de los dos cilindros. Esta diferencia es evidentemente nula, como expresamos antes, cuando el ángulo es de 180°. En este caso el pulsador no envía aceite a la máquina. Para un gasto determinado del pulsador corresponde una cierta deformación en el ejemplar de ensayo. Esta deformación se repetiría constantemente en cada ciclo del pulsador si el material se mantuviera dentro del período elástico y además si no hubiera ninguna pérdida de aceite. Estas condiciones no se realizan generalmente, por cuyo motivo la cantidad de aceite que vuelve al pulsador es algo menor que la impulsada por éste a la máquina de ensayo. Para compensar la pérdida es necesario que la bomba de la máquina introduzca en el sistema de cilindros una pequeña cantidad de aceite adicional. El exceso de este aceite adicional resulta automáticamente expulsado, en cada ciclo del pulsador, por una válvula de escape que se regula de antemano para la presión máxima que debe aplicarse al ejemplar en la máquina de ensayo.

El dispositivo utilizado consiste en un cilindro sin cuero y sin rozamiento apreciable, que se halla constantemente en comunicación con el pulsador; dentro de este cilindro se mueve un émbolo sostenido por un resorte de espiral que trabaja a la extensión. El alargamiento de este re-

sorte, bajo la acción del émbolo que recibe la presión del aceite del pulsador, es utilizado para la medida de dicha presión. A este efecto puede registrarse dicho alargamiento con una aguja que gira sobre una circunferencia graduada. Durante el funcionamiento del pulsador las variaciones de presión se ponen de manifiesto por las oscilaciones de la aguja. Además, el resorte de medida del limitador de presión máxima puede ser tendido de antemano por medio de un tornillo; en esas condiciones el émbolo penetra en su cilindro hasta obturar un pequeño orificio existente en la pared de éste. Por otra parte, dicho orificio puede ser más o menos cerrado con una válvula de punta colocada exteriormente al cilindro. El depósito de aceite del cilindro está en comunicación con la bomba de la máquina. Cuando la válvula se encuentra abierta el aceite del cilindro limitador de presión se escapa por esta, desde que el émbolo no cierra más el orificio de la pared. Pero este orificio está abierto cuando la presión del aceite del pulsador excede la presión impuesta previamente por el resorte al émbolo del limitador de presión; este émbolo de medida obra pues como válvula de escape para el aceite en exceso y como limitador de presión. El gasto de la bomba puede ser graduado de manera que el exceso de aceite sea apenas perceptible. El límite inferior de la presión se gradúa con otro aparato análogo.

Máquinas para ensayos de fatiga por flexión rotativa — El en-

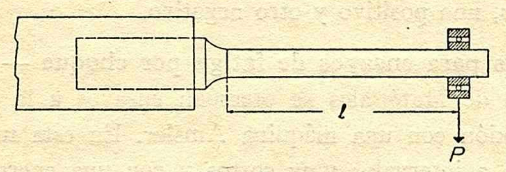


Fig. 6

sayo de fatiga que ha sido objeto de mayor cantidad de estudios e investigaciones es el de flexión rotativa. Las máquinas usadas son relativamente sencillas. Se emplean máquinas que permiten disponer el ejemplar cargado por uno de los extremos tal como se indique esquemati-

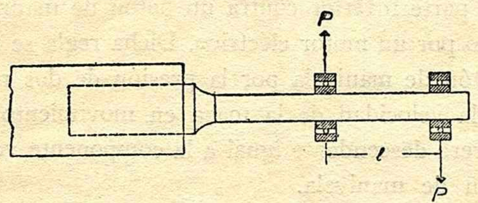


Fig. 7

camente en la fig. 6, cargado en dos puntos como se ve en la fig. 7 o

cargado en cuatro puntos como indica la fig 8. En todos los casos se hace girar el ejemplar a razón de 1500 a 3000 vueltas por minuto. Por consiguiente todas las fibras, excepto la neutra, sufren durante cada revolución un ciclo de esfuerzos alternados.

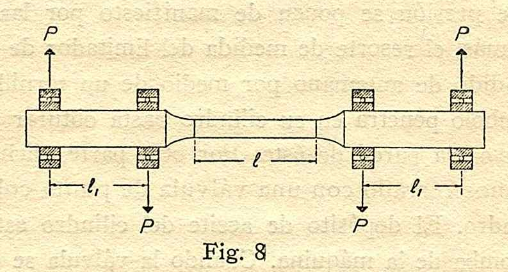


Fig. 8

Máquinas para ensayos de fatiga por torsión — En este tipo de máquinas el ejemplar se halla sostenido, generalmente, en sus dos extremos por medio de dispositivos especiales de mordazas. Uno de dichos extremos se encuentra fijado a un péndulo o a cualquier otro aparato de medida que permita la apreciación del valor del momento de torsión. En el otro extremo de la barra de ensayo actúa el par de torsión. Puede disponerse la máquina en forma de que el valor del momento de torsión varíe entre cero y un máximo positivo o negativo (p. ej. torsión hacia la derecha o hacia la izquierda, respectivamente) o entre dos límites, uno positivo y otro negativo.

Máquinas para ensayos de fatiga por choque — En el Instituto de Ensayo de Materiales se efectúan ensayos a la extensión, compresión y flexión con una máquina Amsler. En esta máquina la maza es proyectada, a intervalos muy cortos y con una energía constante de choque, contra el ejemplar de ensayo y durante todo el tiempo que sea preciso para romperlo o para producirle una deformación preestablecida. La maza está constituída por una pieza metálica de forma prismática guiada verticalmente y provista de una regla transversal que se apoya en su parte inferior contra un botón de manivela, solidario de un árbol movido por un motor eléctrico. Dicha regla se mantiene en contacto con el botón de manivela por la presión de dos resortes verticales de suerte que la velocidad de la maza en movimiento es en cada instante de su carrera descendente igual a la componente vertical de la velocidad del botón de manivela.

La maza lleva en su parte inferior un punzón, que en los ensayos de compresión golpea la pieza de ensayo. Esta última se encuentra co-

locada a una altura tal que el choque del punzón se produce en el instante en que la maza ha adquirido su velocidad máxima, que se verifica cuando el botón de manivela, durante la mitad descendente de la circunferencia que describe, pasa el diámetro horizontal de ésta y es por consiguiente igual a la velocidad circular del botón.

Inmediatamente del choque la maza es rechazada hacia arriba, a consecuencia de la reacción elástica de la barra que obra como un resorte, mientras el botón de manivela abandona la regla transversal de la maza y continúa libremente su movimiento circular. La velocidad con que la maza golpea al ejemplar depende pues de la velocidad de rotación del botón de la manivela, y se puede modificarla a voluntad con sólo variar la posición del botón con respecto al centro de rotación y mantenerla constante durante cada ensayo por medio de un volante accionado por el motor eléctrico. Del peso de la maza, del número de vueltas del eje por minuto y del diámetro de la circunferencia descripta por el botón de manivela, es fácil deducir la fuerza $\frac{m\,v^2}{2}$ con la cual la maza golpea al ejemplar de ensayo.

Luego de haber perdido contacto con la regla transversal de la maza, el botón de manivela continúa su carrera, y después de haber descripto una circunferencia encuentra de nuevo a esta regla durante la mitad ascendente de su rotación. Levanta así otra vez la maza y el juego de esta vuelve a repetirse. En realidad existen dos botones de manivela diametralmente opuestos, en lugar de uno. Esta disposición tiene por objeto por una parte evitar choques inútiles entre el botón de manivela y la regla transversal y por otra dar al ejemplar doble número de golpes, es decir, dos por cada vuelta del eje. Como la maza rebota después del golpe con un velocidad casi igual a la que tenía con anterioridad al mismo, resulta que el nuevo contacto entre el botón y la regla transversal se produce a una velocidad muy pequeña.

Cuando se produce la rotura del ejemplar la maza desciende algo más que cuando golpeaba al mismo y entonces mueve un gatillo que actúa sobre una llave que corta la corriente y detiene el aparato. Se puede leer entonces sobre un contador el número de golpes aplicados. En el ensayo de extensión el ejemplar se fija, mediante un dispositivo especial, a la parte superior del aparato, en forma tal que la parte superior de la maza es la que golpea sobre la pieza que sostiene la cabeza inferior del ejemplar.

Máquinas para ensayos de fatiga por esfuerzos combinados — Las máquinas utilizadas para estos ensayos varían considerablemente en lo que se refiere a su disposición. Dado que esta clase de ensayos corresponde principalmente a trabajos de investigación; puede afirmarse que en general cada investigador dispone sus aparatos de ensayo en la forma que considera más conveniente para los fines de su trabajo.

CAPITULO III

ENSAYOS A LA EXTENSION

Introducción — En todo lo que se refiere a los ensayos a la extensión consideraremos especialmente el caso de los materiales metálicos. El carácter general con que deseamos enfocar el estudio de cada uno de los ensayos nos induce a proceder así, por cuanto es en el ensayo a la extensión de los metales donde puede observarse claramente la producción de una serie de fenómenos y transformaciones que podrían pasar inadvertidas si la experiencia se efectuara sobre otros materiales tales como las piedras naturales, los hormigones, etc.

Por otra parte hay que tener presente que el ensayo de extensión está considerado prácticamente como el de mayor importancia en el estudio experimental de las propiedades de los metales. La relación entre la carga total aplicada al cuerpo y el área de su sección transversal se denomina generalmente *tensión, o intensidad de esfuerzo de extensión, o esfuerzo unitario de extensión.*

Diagramas — Supongamos que se aplica a una barra metálica un esfuerzo de extensión que va aumentando gradualmente. Se observará entonces un cambio en la forma del cuerpo. Al mismo tiempo que un alargamiento se producirá una disminución en las dimensiones de la sección transversal pues el volumen del cuerpo se mantendrá sensiblemente invariable.

Si representamos gráficamente la marcha del ensayo obtendremos un diagrama que será semejante al que indican la fig. 9 o la fig. 10, según sea la naturaleza del metal ensayado. Debemos hacer notar que las deformaciones han sido registradas — para hacerlas bien visibles — utilizando una escala muy grande.

Las máquinas de ensayo permiten generalmente el trazado automático del diagrama, no obstante en ciertos casos se dibuja los diagramas anotando los datos tomados directamente por el operador durante la ejecución de la experiencia. A este efecto pueden seguirse tres método. *Primero*: Se anota para incrementos iguales de la carga s los

alargamientos producidos (fig. 11) que se miden con los aparatos denominados extensómetros. Este método presenta el inconveniente de

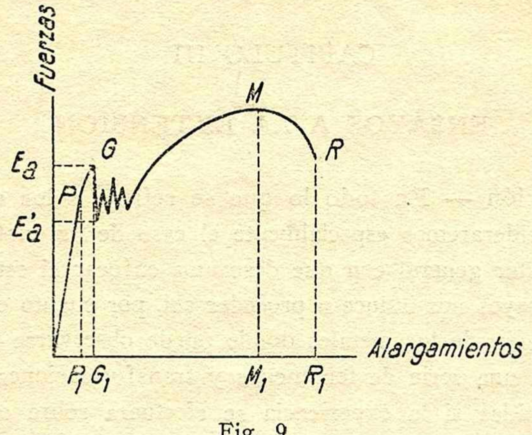


Fig. 9

suministrar muy pocos puntos en la parte que sigue a *G* (fig. 9), cuyo conocimiento presenta generalmente mucho interés.

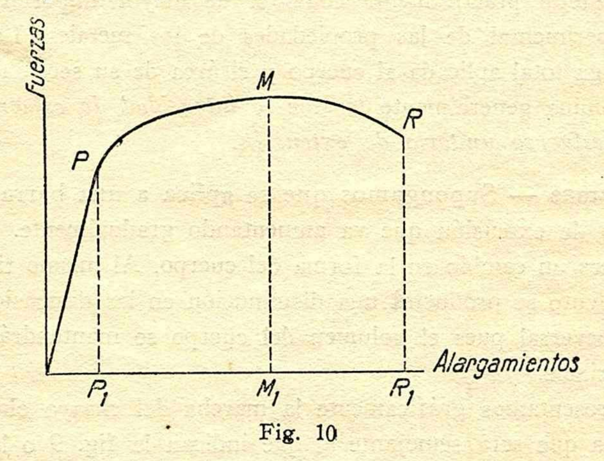


Fig. 10

Segundo: Se anotan los valores de las cargas correspondientes a incrementos iguales *e*, de los alargamientos (fig. 12). Se dispone de este modo de un mayor número de puntos para trazar la parte siguiente a *G*.

Tercero: Se anotan las deformaciones corespondientes a incrementos iguales pero relativamente grandes de las cargas hasta la proximidad de *G*; se continúa luego con incrementos iguales de la carga, pero mucho menores, hasta pasar la parte sinuosa. Se puede continuar entonces con incrementos de carga iguales a los primitivos.

Fines de un ensayo a la extensión. — En los ensayos a la extensión puede determinarse las siguientes características:

a) Límite de proporcionalidad.

b) Módulo de elasticidad o módulo de Young.

c) Límite de elasticidad.

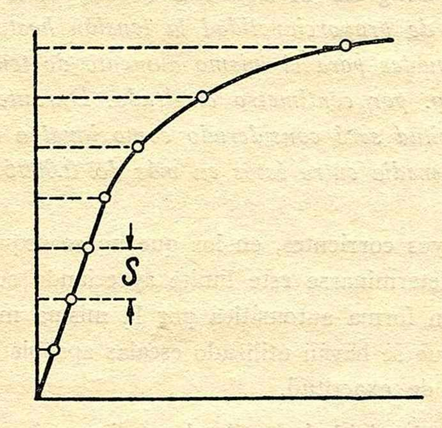


Fig. 11

d) Límites aparentes de elasticidad. (Yield point).

e) Límite de rotura.

f) Tensión real de rotura.

f) Resistencia a la extensión.

h) Ductilidad o alargamiento permanente de rotura.

i) Contracción transversal.

j) Estricción.

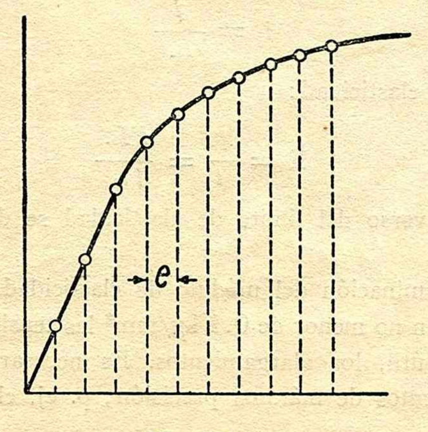


Fig. 12

k) Trabajo de deformación.

Límite de proporcionalidad. — Es la tensión que corresponde a la terminación del período proporcional (punto P del diagrama), durante el cual se cumple la ley de Hooke. La definición respectiva, aprobada por el Congreso de Bruxelas (1906) es la siguiente: *Se designa por límite de proporcionalidad la tensión hasta la cual los alargamientos son iguales para el mismo aumento de tensión, aproximadamente de 100 kg. por centímetro cuadrado. Durante este intervalo el aumento de longitud será considerado como igual a los precedentes, si no difiere de la media entre éstos en más del 0.0005 % de la longitud observada.*

En los ensayos corrientes, en los que no se requiere una precisión estricta, puede determinarse este límite apreciando su valor en el diagrama trazado en forma automática por la misma máquina de ensayo, a condición de que se hayan utilizado escalas apropiadas para obtener el máximo posible de exactitud.

Módulo de elasticidad. — Se denomina así a la relación constante — durante el período proporcional — entre la tensión y el alargamiento por unidad de longitud.

Sea P la carga aplicada; l el alargamiento respectivo; L la longitud útil y ω la sección transversal. La tensión será:

$$p = \frac{P}{\omega}$$

el alargamiento unitario:

$$i = \frac{l}{L.}$$

y el módulo de elasticidad:

$$E = \frac{p}{i} = \frac{PL.}{l\,\omega}$$

El valor inverso del límite de elasticidad se denomina coeficiente de extensión.

En la determinación del módulo de elasticidad deben medirse con una aproximación no menor de 0.1 kg/mm² las tensiones, y de 0.0005 % de la longitud útil, los alargamientos. Es necesario por consiguiente utilizar instrumentos de máxima precisión; p. ej. el aparato de espejos de Martens.

Límite de elasticidad. — *Es la tensión máxima bajo la cual el material puede ser considerado como perfectamente elástico en la práctica. El límite puede ser fijado aproximadamente en un 0.001 % del alargamiento permanente.* (C. de B. 1906).

En vista de las dificultades que se presentan en la práctica para la determinación del límite de elasticidad, se acepta habitualmente conforme a lo admitido por la A. S. T. M. (E. 6-36), que el límite proporcional equivale al límite elástico para casi todos los metales y en consecuencia el límite proporcional es frecuentemente llamado *límite elástico proporcional.*

Límite aparente de elasticidad. — Observando el diagrama de la fig. 9 puede comprobarse la existencia de un período durante el cual los alargamientos crecen muy rápidamente, en tanto que la tensión oscila entre dos valores límites *Ea* y *E'a* relativamente próximos; se trata de la parte inmediata al punto *G*. El más alto de esos dos límites se denomina *límite aparente superior de elasticidad* y el otro *límite aparente inferior de elasticidad.*

El primero llamado también *límite de fluencia* (*Yield Point*) tiene más valor como ensayo comercial, mientras que el segundo caracteriza la importancia de la deformación plástica originada por la variación interna de la estructura del metal, que se produce al alcanzar el límite superior. El límite inferior es el valor reproducido de manera más constante en los ensayos, pues el límite superior resulta influído por la forma y dimensiones del ejemplar.

Generalmente, la simple observación del aparato usado para la medida de los esfuerzos permite obtener los valores de los límites aparentes de elasticidad con suficiente exactitud. Cuando se emplea una balanza de inclinación o un manómetro se comprueba que al llegar al límite superior se detiene por un instante la marcha de la aguja indicadora, o el ascenso de la columna de mercurio, según sea la clase de instrumento usado. Se produce luego una oscilación en la aguja indicadora o en la columna de mercurio, que observadas atentamente permiten la determinación del límite inferior. Cuando se emplea una balanza se ve caer el peso correspondiente en el mismo instante en que se alcanza el límite superior.

En el diagrama de la fig. 9 están claramente acusados ambos límites. No obstante cabe observar, algunas veces, que los puntos *P* y *G* coinciden o que la parte del diagrama situada a continuación de *G* está

constituída por una recta aproximadamente recta y horizontal, o que ocurren ambas cosas conjuntamente.

Es ventajoso que, como medio eficaz de comprobación se haga en todos los ensayos el trazado del diagrama a las escalas que resultan más convenientes de acuerdo con la resistencia del material y las dimensiones de la sección transversal.

Cuando se tratara de un metal cuyo diagrama de ensayo corresponda al tipo que indica la fig. 10, los procedimientos anteriores no serían, evidentemente, aplicables.

Según lo resuelto en el Congreso de Bruxelas, el límite aparente de elasticidad — en este caso — está determinado por la tensión que corresponde a un alargamiento permanente fijado de antemano y que generalmente está comprendido entre 0.2 y 0.5 %, debiéndose medir las variaciones de longitud con un instrumento cuya aproximación no sea menor de 0.1 por ciento.

La aplicación de este método puede hacerse directamente durante el ensayo o sobre el diagrama. En el primer caso puede utilizarse un extensómetro que permita medir los alargamientos con la aproximación mencionada y cuando no se requiera mucha exactitud utilizando una regla graduada en tantos por ciento de la longitud de medida. Esta regla que se coloca al lado del ejemplar permite apreciar inmediatamente el

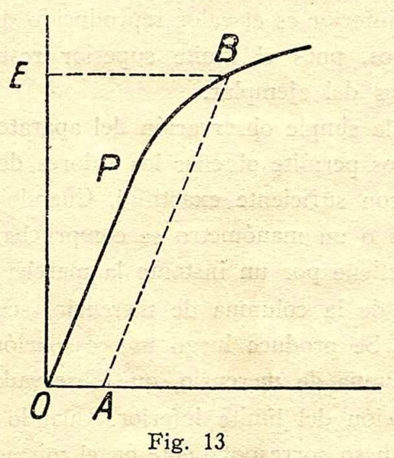


Fig. 13

instante en que el alargamiento alcanza la magnitud prescripta. Anotando entonces la carga se podrá calcular la tensión que corresponderá al límite aparente de elasticidad.

La determinación de este límite sobre el diagrama puede hacerse

en la siguiente forma. Se toma una magnitud *OA* (fig. 13) equivalente a 0.2 % de la longitud de medida, por ejemplo, y desde el punto *A* se traza una recta paralela a la línea *OP* correspondiente al período proporcional. La carga correspondiente al punto *B* en que esta recta corta a la curva del diagrama determina el valor del límite aparente de elasticidad. Dicha carga estará representada por la ordenada *OE*.

Se basa este método en el hecho conocido de que cuando se suspende el ensayo en un punto cualquiera, — anulando la carga — una vez excesivo el límite de elasticidad, la deformación permaente residual está representada por la abscisa limitada por el punto en que una línea, paralela a la correspondiente al período proporcional, trazada desde el punto en que se suspendió el ensayo, corta al eje de las abscisas.

El límite aparente de elasticidad de Johnson se obtiene del siguiente modo. Desde el origen *O* (fig. 14) se traza una línea *OB* cuya pendiente referida al eje vertical sea un 50 % mayor que la línea *OP*. Se

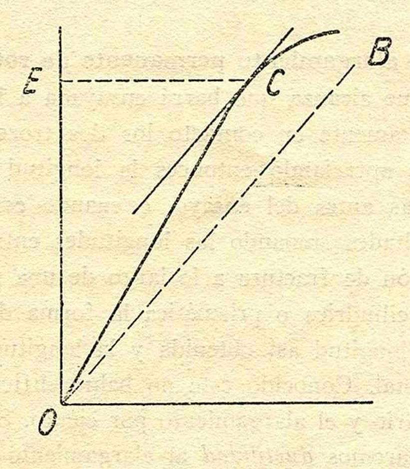


Fig. 14

traza una tangente a la curva del diagrama paralela a dicha línea *OB* y el punto de tangencia *C* corresponderá al límite de Johnson que se expresará por la ordenada *OE*.

Es evidente que la aplicación de este método exige que el diagrama sea dibujado a una escala tal que permita apreciar fácilmente las deformaciones producidas durante el período proporcional.

Límite de rotura. — Conforme a lo resuelto en el Congreso de Bruxelas, se llama así a la tensión máxima alcanzada durante el

ensayo. Esta constante corresponderá, en consecuencia, a lo que se denomina generalmente en la actualidad *tensión real de rotura* y se determina dividiendo la carga correspondiente a la ordenada RR_1 de los diagramas de las figs. 9 y 10 por el área de la sección de rotura.

Se llama *resistencia a la extensión* al cociente que resulta de dividir la carga máxima, ordenada MM_1, de los diagramas de las figs. 9 y 10 por la sección primitiva ω_o de la barra.

La tensión real de rotura es superior — en muchos casos excede del doble — a la resistencia a la extensión.

La máquina de ensayo debe permitir la apreciación de las tensiones con una aproximación que no exceda de 50 kg/cm².

La determinación de la carga máxima se hace con dispositivos muy simples, que permiten su registro con toda exactitud. Estos dispositivos varían según sea el tipo de aparato registrador de las cargas. Puede ser un flotador, equilibrado, cuando se trata de una columna de mercurio; una aguja libre, en el caso de manómetros o balanzas de inclinación, etc.

Ductilidad o alargamiento permanente de rotura. — El alargamiento máximo que alcanza una barra ensayada a la extensión, se mide poniendo exactamente en contacto los dos trozos — una vez roto el ejemplar — y apreciando entonces la longitud comprendida entre dos marcas, hechas antes del ensayo, o cuando esto no fuera posible u ofreciera dificultades sumando las longitudes entre las marcas y los bordes de la sección de fractura a lo largo de una generatriz o de una arista, según sea cilíndrica o prismática la forma del ejemplar. La diferencia entre la longitud así obtenida y la longitud primitiva expresa el alargamiento total. Conocido éste no habrá dificultad en calcular el alargamiento unitario y el alargamiento por ciento. Siguiendo la préctica corriente denominaremos *ductilidad* al alargamiento expresado en tanto por ciento. Ejercen influencia sobre los resultados diferentes factores que estudiaremos separadamente, con el fin de fundar el procedimiento generalmente adoptado para obtener su medida.

Alargamiento general uniforme y alargamiento local o de estricción. — El alargamiento total que se produce en una barra ensayada a la extensión puede ser considerado como constituído por dos sumandos. Primero. el alargamiento producido en forma aproximadamente uniforme a lo largo de toda la barra hasta el momento en que se inicia la estricción, vale decir el representado por la abscisa OM_1 (fig. 9

y 10); segundo: el alargamiento de la zona influída por la estricción, es decir, el correspondiente al segmento $M_1 R_1$ (fig. 9 y 10).

Supongamos además — por ahora — que la medida del alargamiento se hace sobre un trozo de barra de longitud Lo, situada a una distancia suficientemente grande de los extremos de la barra, para que las mordazas de la máquina de ensayo o las cabezas de los ejemplares no influyan sobre las deformaciones producidas allí; además que la sección de fractura se halla situada en el tercio central de la longitud de medida.

La longitud del trozo L_o después de rota la barra se habrá transformado en L_1. El alargamiento total será pues:

$$l = L_1 - L_o$$

Llamando l_u al alargamiento uniforme producido en toda la extensión L_1, y l_e al alargamiento correspondiente a la zona de la estricción, tendremos:

$$l = l_u + l_e$$

y por consiguiente el alargamiento por ciento podrá expresarse así:

$$\delta = \delta_u + \delta_e$$

El primero de los sumandos, l_u es sensiblemente proporcional a la longitud L_0, pues durante el período anterior a la estricción los alargamientos se producen de una manera aproximadamente uniforme en toda la longitud de la barra.

Si llamamos β al alargamiento uniforme por unidad de longitud, el alargamiento en el trozo considerado será:

$$l_u = \beta L_o$$

y el alargamiento por ciento:

$$\delta_u = 100 \beta$$

El valor de β puede ser admitido como constante para cada material.

En el caso de una barra de sección circular se puede establecer, admitiendo que el volumen de la barra permanece invariable, — lo que puede aceptarse como exacto, pues el error en que podemos incurrir es en general inferior al 1 % — que el valor de β estará dado por la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{d^2{}_o - d^2{}_1}{d^2{}_1}$$

en la que d_o es el diámetro primitivo de la barra y d_1 el diámetro en parte de alargamiento uniforme, a una distancia de la fractura, bastante grande para que no haya que temer la influencia de la estricción.

El alargamiento l_e es, como la experiencia lo demuestra, proporcional para un mismo material y para las mismas formas de la sección a las dimensiones de esta y por consiguiente será función de su superficie. Se admite, de acuerdo con las experiencias de Bauschinger, que:

$$l_e = \varphi \sqrt{\omega_o}$$

siendo ω_o la sección primitiva de la barra.

Según las experiencias de Rosenthal, Lefevre y otros, en el caso de una barra de sección circular:

$$l_e = d_o \left(\frac{d^2{}_o - d^2{}_2}{d^2{}_o} \right)$$

siendo d_2 el diámetro de la sección de rotura.

El alargamiento total puede expresarse así:

$$l = \beta L_o + \varphi \sqrt{\omega_o}$$

y en tanto por ciento:

$$\delta = 100 \left(\beta + \frac{\varphi \sqrt{\omega_o}}{L_o} \right)$$

Relación necesaria entre la longitud de medida y la sección de la barra — Suporgamos otra barra, del mismo material, pero de sección ω'_o y de longitud L'_o. En esta barra

$$\delta = 100 \left(\beta + \frac{\varphi \sqrt{\omega'_o}}{L'_o} \right)$$

Pero como debemos obtener valores iguales para δ y δ' siempre que se trate de barras de un mismo material, tendrá que ser:

$$\frac{\sqrt{\omega_o}}{L_o} = \frac{\sqrt{\omega'_o}}{L'_o}$$

y por consiguiente:

$$\frac{L_o}{L'_o} = \frac{\sqrt{\omega_o}}{\sqrt{\omega'_o}}$$

De lo que se deduce que los valores δ de la ductilidad tendrán el mismo valor en todas las barras del mismo metal, si las longitudes de medida son proporcionales a las raíces cuadradas de las secciones.

En el caso de barras circulares la relación normal, entre la longitud útil y el diámetro, adoptada en Inglaterra y en Estados Unidos de la América del Norte es igual a 4; en Francia a 7.3; en Alemania a 10; en Uruguay a 5, de acuerdo con lo resuelto en la reunión celebrada por la Internacional Standards Association en Budapest en Setiembre de 1936.

En el caso de que las barras no fueran de sección circular es fácil deducir la longitud correspondiente refiriéndola a la $\sqrt{\omega_o}$ Se obtendrá así para el caso de haberse adoptado como longitud de medida la equivalente a $5do$:

($10/\sqrt{\pi}$)

$$L_o = 5.65\sqrt{\omega_o}$$

En todos los casos se toma para la longitud útil, de acuerdo con lo resuelto en el Congreso de Bruxelas, un número entero de centímetros. Al expresar el valor de la ductilidad conviene indicar como índice la relación entre la longitud tomada y la raíz cuadrada de la sección

A causa de la influencia de la forma de la sección sobre la estricción deberá adoptarse para los ejemplares la sección rectangular, — siguiendo las normas votadas en el Congreso de Bruxelas — siempre que ello sea posible, un ancho igual a tres o cuatro veces el espesor.

Medida de la ductilidad en el caso de que la longitud total de la barra no permita apreciar directamente el alargamiento correspondiente a la longitud útil normal — Si debiera operarse sobre un ejemplar cuya longitud fuese menor de la que correspondiera, según lo que acabamos de expresar, se puede seguir el siguiente procedimiento. Supongamos

que la longitud total del ejemplar — fuera de la influencia de mordazas o cabezas, — sea L'_o y su sección ω'_o. Llamemos L''_o a la longitud de una parte mínima de la misma barra, pero que comprenda íntegramente la estricción.

Se puede establecer de acuerdo con lo expresado antes:

$$l' = \beta L'_o + \varphi \sqrt{\omega'_o} \quad \text{y} \quad l'' = \beta L''_o + \varphi \sqrt{\omega'_o}$$

De donde se deduce:

$$\beta = \frac{l' - l''}{L'_o - L''_o}$$

y:

$$\varphi \sqrt{\omega'_o} = \frac{L'_o\, l'' - L''_o\, l'}{L'_o - L''_o}$$

Luego:

$$\delta = 100 \left(\frac{l' - l''}{L'_o - L''_o} + \frac{L'_o\, l'' - L''_o\, l'}{(L'_o - L''_o)\, L_o} \right)$$

En la que Lo representa la longitud que hubiera correspondido a la longitud útil en el caso de haberse dispuesto de una barra suficientemente larga.

Este procedimiento indirecto es poco aplicado en la práctica porque cuando se opera sobre ejemplares de escasa longitud es difícil elegir dos partes de largo bastante desigual y uno de los cuales — el menor — comprenda además toda la parte influída por la estricción. No cumpliéndose esta condición los resultados resultarán influídos por errores que pueden ser grandes. Evidentemente el procedimiento sería difícilmente aplicable, por esta circunstancia, cuando la longitud normal de medida es igual a $5.65\sqrt{\omega_o}$

Reducción de la ductilidad obtenida δ_n con una longitud $l = nd_o$ a otra δ_m correspondiente a $l_o = md_o$. — Se puede establecer las siguientes expresiones:

$$\delta_m = 100 \left(\beta + \frac{\varphi \sqrt{\omega_o}}{md_o} \right)$$

$$\delta_n = 100 \left(\beta + \frac{\varphi \sqrt{\omega_o}}{nd_o} \right)$$

de las que se deduce:

$$\delta_m = \delta_n + 100 \frac{\varphi \sqrt{\omega_o}}{d_o} \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right)$$

y recordando que hemos admitido:

$$\varphi \sqrt{w_o} = d_o \left(\frac{d^2_o - d^2_2}{d^2_o} \right)$$

resultará:

$$\delta_m = \delta_n + 100 \left(\frac{d^2_o - d^2_2}{d^2_o} \right) \left(\frac{1}{m} - \frac{1}{n} \right)$$

Podríamos haber seguido otro camino. Si en lugar de partir de las fórmulas correspondientes a la ductilidad lo hubiéramos hecho de las correspondientes a los alargamientos totales, tendríamos:

$$l_m = \beta \, md_o + \varphi \sqrt{w_o}$$

$$l_n = \beta \, nd_o + \varphi \sqrt{w_o}$$

de donde:

$$l_m = l_n + \beta \, d_o \, (m - n)$$

y considerando que

$$\delta = \frac{l}{L_o} \times 100$$

resultará:

$$\delta_m = \delta_n + 100 \beta \left(\frac{m - n}{m} \right)$$

y si recordamos que hemos aceptado que

$$\beta = \frac{d^2_o - d^2_1}{d^2_1}$$

tendremos finalmente:

$$\delta_m = \delta_n + 100 \left(\frac{d^2{}_o - d^2{}_1}{d^2{}_1} \quad \frac{m - n}{m} \right)$$

Determinación de δ en una barra que no hubiera sido marcada — Podemos reemplazar en la expresión general:

$$\delta_m = 100\ \beta + \frac{\varphi \sqrt{\omega_o}}{md_o}$$

β y $\varphi\sqrt{\omega_o}$ por sus valores indicados antes y tendremos entonces:

$$\delta = 100 \left[\frac{d^2{}_o - d^2{}_1}{d^2{}_1} + \frac{1}{m} \left(\frac{d^2{}_o - d^2{}_2}{d^2{}_o} \right) \right]$$

La aplicación de esta fórmula como la de algunas anteriores requieren la medida de d_1 y d_2.

Fórmula determinada por Broniewski. — Partiendo de las consideraciones de Krupkowski, Broniewski estableció para el alargamiento de rotura la siguiente expresión:

$$A'\% = A\ \% + b\ \% \left[\frac{n\left(\frac{C\ \%}{100 - C\ \%} - \frac{A\ \% - b\ \%}{100} \right) + 1}{n'\left(\frac{C\ \%}{100 - C\ \%} - \frac{A\ \% - b\ \%}{100} \right) + 1} - 1 \right]$$

en la que $A'\ \%$ es el alargamiento total correspondiente a $L = n'd_o$; $A\ \%$ el alargamiento total para $L = nd_o$; $b\ \%$ el alargamiento de estricción para $L = nd_o$; $b\ \% = \frac{100\ \Delta\ l}{nd_o}$; $C\ \%$ es la estricción: $\left(1 - \frac{d^2{}_2}{d^2{}_o}\right) \times 100.$

Procedimiento volumétrico para la medida del alargamiento en una barra no marcada. — Sea la barra indicada en la fig. 15 de acción circular cuyo diámetro d_o es conocido y consideremos que la longitud de medida adoptada es $L_o = nd_o$. Aceptaremos como base del procedimiento que vamos a describir, tal como hicimos antes, que el volumen del ejemplar se ha mantenido invariable.

Si logramos hallar la longitud L_n de la parte del ejemplar roto —

comprendida entre dos planos normales al eje de la barra y equidistantes de la sección de fractura — cuyo volumen V sea:

$$V = L_o \frac{\pi d^2_o}{4}$$

habremos resuelto el problema pues el alargamiento total será:

$$l = L_n - L_o$$

y el alargamiento por ciento:

$$\delta = \frac{L_n - L_o}{L_o} \times 100$$

La determinación de L_n puede hacerse con facilidad. Al efecto, cortemos con una sierra metálica la barra por los planos A y B lo suficientemente separados para abarcar totalmente entre ellos la zona de estricción; podrá tomarse una longitud aproximadamente igual a 4 *do*.

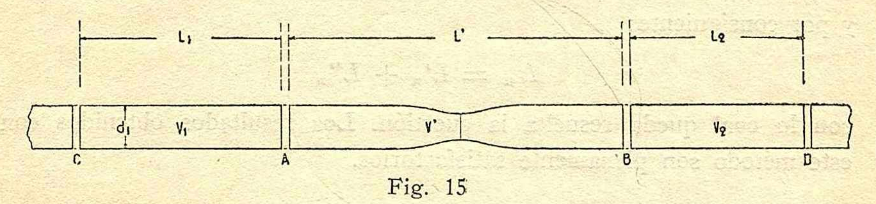


Fig. 15

La distancia comprendida entre los planos A y B que llamaremos L'_n puede medirse sin dificultad, con la aproximación de 0.1 % que es suficiente para este ensayo. El volumen correspondiente, que denominaremos V', puede apreciarse fácilmente con un volumenómetro Breuil con una aproximación de 10 mm^3, que es también suficiente. Si n es superior a 4 como ocurre en general, el volumen V será evidentemente mayor que V'. El problema queda reducido entonces a encontrar la longitud L''_n de barra uniformemente deformada, admitiendo como cierta — lo que, como sabemos, tampoco es rigurosamente exacto — la existencia de los alargamientos uniformes, cuyo volumen sea:

$$V''_n = V - V'_n$$

Para resolver este punto cortaremos la barra por los planos C y D, normales al eje de la barra. Mediremos en seguida con el mismo volumenómetro el volumen $V_1 + V_2$ de los dos nuevos trozos de barra. La longitud de cada uno de estos trozos no debe exceder de la dimensión

máxima admitida por la capacidad del volumenómetro, pero la longitud total no será menor de 6 d_o. Sean L_1 y L_2 las longitudes de los dos trozos medidos directamente. La sección ω_1 de la barra en la zona de alargamiento uniforme será entonces:

$$\omega_1 = \frac{V_1 + V_2}{L_1 + L_2}$$

Hemos supuesto la fractura ubicada en la parte céntrica de la barra; cuando no ocurriera esto, no podría generalmente obtenerse los dos trozos de barra a que nos referimos. En tal caso se operaría sobre uno o dos trozos sacados del mismo lado de la sección de fractura, debiendo la longitud total ser como en el caso anterior de $6\ d_o$.

La longitud L''_n puede ahora determinarse. Será:

$$L''_n = \frac{V''}{\omega_1}$$

y por consiguiente:

$$L_n = L'_n + L''_n$$

con lo cual queda resuelta la cuestión. Los resultados obtenidos con este método son plenamente satisfactorios.

Influencia de las cabezas de las barras y de las mordazas de las máquinas de ensayo. — Los ensayos a la extensión pueden hacerse sobre barras preparadas de acuerdo con ciertas formas y dimensiones establecidas reglamentariamente o sobre barras comunes cuya sección es invariable en toda su longitud.

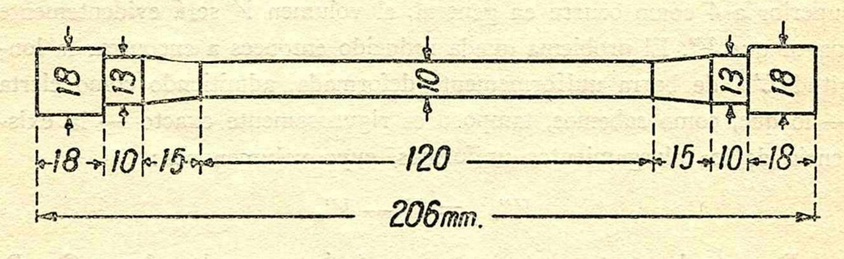


Fig. 16

La fig. 16 indica una de las barras citadas en primer término, a las que se denomina corrientemente *barras normales*. Se utiliza estas ba-

rras cuando se desea obtener mayor precisión en los ensayos, vale decir cuando se trata de impedir que influyan sobre los resultados algunas causas de error. La forma que se da a las cabezas de estas barras y el dispositivo que se emplea en la máquina de ensayo, para sostenerlas durante la experiencia, permite en efecto conseguir que el esfuerzo de extensión siga exactamente la dirección del eje del ejemplar, evitando de este modo que se desarrollen esfuerzos secundarios que podrían falsear los resultados.

Pero tanto si se emplea estas baras normales como si se usa las barras comunes de sección uniforme, es menester que se tenga presente la influencia que ejerce en las partes extremas de la barra, las cabezas en el primer caso y las mordazas con que se fijan a la máquina de ensayo en el segundo.

Hemos visto como una barra, sometida a un esfuerzo de extensión, al mismo tiempo que se alarga experimenta una disminución en la superficie de su sección transversal.

Prácticamente la existencia de las cabezas o de las mordazas no permite que las secciones inmediatas se contraigan libremente y al no producirse libremente la contracción transversal es evidente que tampoco se producirá allí todo el alargamiento que se originaría en caso de no existir tal impedimento.

Es necesario pues que las medidas del alargamiento sean hechas en una parte de la barra donde no se haga sentir la influencia de cabezas o mordazas. La conclusión aprobada en el Congreso de Bruxelas es la guiente:

" Afin de evitar la influencia de las cabezas en los ejemplares que " estén provistos de ellas o de las mordazas en los otros casos, es pre- " ciso que la longitud de la parte prismática o de la comprendida entre " las mordazas exceda de la longitud de medida por lo menos en:

"a) Un diámetro en cada extremidad si se trata de ejemplares ci- " líndricos.

"b) Un ancho en cada extremidad si se trata de ejemplares pris- " máticos.

"En las barras de ensayo con cabezas conviene que la transición " entre éstas y el trozo útil no se haga en forma brusca. Al efecto, de- " berá intercalarse una parte de forma tronco-cónica".

Influencia del punto en que se produce la fractura. — La longitud de medida puede limitarse con dos pequeños trazos que se hacen con una punta de acero duro. Sin embargo, el procedimiento más conveniente, — que se usa hoy en todos los laboratorios — consiste en hacer sobre todo el largo de la barra una serie de trazos equidistantes un centímetro.

Esta serie de trazos y marcas puede hacerse con la misma punta de acero, utilizando una regla graduada o lo que es mejor, una plantilla especial. Pero, el procedimiento más cómodo consiste en emplear la máquina de marcar barras.

Bien; supongamos que tenemos una barra así marcada que se ha roto en su parte céntrica al ser ensayada a la extensión.

Es posible dibujar un diagrama tal como el indicado en la fig. 17

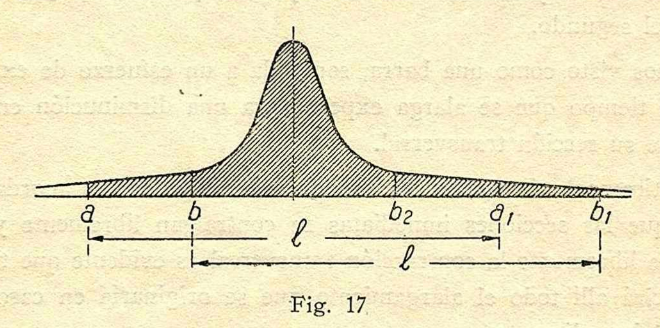


Fig. 17

en el que se han tomado como ordenadas los alargamientos correspondientes a cada uno de los trozos cuya longitud primitiva era de un centímetro.

El alargamiento total de la barra en la longitud de medida L_o estará representado, en determinada escala, por el área de la parte del diagrama situado sobre $a a_1$ que corresponde a la longitud L_o.

Supongamos ahora que la fractura se produjo fuera de la zona céntrica de la barra. El alargamiento estaría representado, por ejemplo, por el área cituada sobre bb_1 Es evidente que el valor obtenido en estas condiciones será menor que el determinado antes.

En efecto, la parte del diagrama sobre ba_1 es común, mientras que la situada sobre $a_1 b_1$ es menor que la situada sobre ab.

Resulta necesario, por consiguiente, tener en cuenta la ubicación de la fractura, si se desea obtener resultados concordantes. La cuestión ha sido resuelta adoptando en todos los casos como valor de alargamiento el que resultaría si la fractura se hubiera producido exactamente en el

punto medio. A tal fin se toma — en vista de la forma simétrica en que se deforma la barra a ambos lados de la sección de fractura — como valor del alargamiento, el del área situada sobre aa_1. Cuando la fractura está ubicada en el centro de la barra, es este efectivamente el valor que se obtiene. En los demás casos será necesario reemplazar la parte de diagrama sobre a_1b_1 por la situada sobre a_1b_2, teniendo en cuenta que, de acuerdo con lo expresado respecto a la simetría de las deformaciones, si $a_1b_1 = ab = a_1b_2$ el área sobre a_1b_2 será igual al área sobre $a\ b$.

Al mencionar el punto medio o la parte céntrica de la barra no debe entenderse que la fractura tiene que encontrarse exactamente en la mitad de la longitud de medida. Los resultados no varían, en forma apreciable, aún cuando la fractura ocupe un lugar cualquiera situado hasta una distancia de $\frac{L_o}{4}$ a cada lado del centro.

La conclusión votada por el Congreso de Bruxelas al respecto es la siguiente:

"Se puede medir el alargamiento: 1.°, midiendo las dos partes de " la barra comprendidas entre los contornos de la fractura y las marcas " que limitan la longitud útil; 2.°, midiendo las divisiones marcadas " sobre la parte prismática de la barra.

"En el primer caso no se hará la determinación del alargamiento " en aquellos ejemplares cuya rotura se produzca en los cuartos extre- " mos de la longitud.

"En el segundo caso se podrá siempre medir el alargamiento de " rotura como si esta se hubiera producido en el medio de la barra, a " causa de la simetría, casi perfecta, de las deformaciones a ambos " lados de la sección de fractura".

Por ejemplo; si la longitud útil correspondiente fuera de 11 cm. habría que medir a cada uno de los lados de la sección de rotura la longitud correspondiente a cinco divisiones, en centímetros, antes del ensayo. Estas medidas se harán a partir de los dos trazos de división inmediatos a la sección de rotura y sumando luego a ambas medidas la correspondiente a la división en que se produjo la rotura.

Si la rotura se produce tan cerca de una extremidad que no permita tomar las cinco divisiones, sino tres, por ejemplo, se tomará como longitud de las dos divisiones que faltan las de las dos divisiones

correspondientes del otro lado de la sección de rotura.

En el caso de barras de sección circular, que es el más frecuente, se procede a la medida del alargamiento poniendo perfectamente en contacto los dos trozos de la barra y midiendo luego la longitud total entre los límites de la longitud útil, cuando la fractura está en la parte central de la barra, y en la forma que se indica en seguida cuando la fractura está fuera de esa parte.

Sea, por ejemplo, la barra AB representada en la fig. 18; supon-

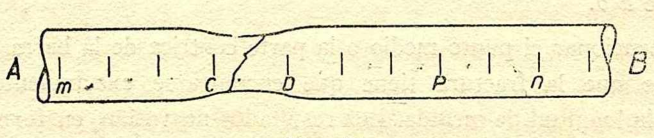


Fig. 18

gamos que la longitud de medida L_0 fuera como antes de 11 cm. Si la fractura se encontrara entre las secciones C y D procederíamos a tomar la medida del alargamiento del siguiente modo:

$$L_1 = mn + np$$

Por consiguiente:

$$l = mn + np - 11$$

$$\delta = \frac{mn + np - 11}{11} \times 100$$

En las barras de sección rectangular o cuadrada no es posible — a causa de las deformaciones que se producen en la sección de fractura — poner perfectamente en contacto los dos trozos. En este caso es preciso medir las dos magnitudes a partir del borde de la fractura, tal como se ha indicado antes.

Todos los que han tenido que efectuar estas medidas saben que, no obstante tratarse de una operación muy sencilla, presenta en la práctica algunas dificultades — principalmente en los casos de barras redondas con cabeza — cuando no se dispone de medios fáciles que permiten mantener inmóvil la barra mientras se toman las medidas.

A solucionar tales inconvenientes tiende el aparato construído en los talleres del Instituto de Ensayo de Materiales, que representa la fig. 19.

Consiste en cuatro soportes que pueden deslizarse a lo largo de las guías formadas en los dos bordes superiores de la base (1) de perfil U. Los dos soportes (2) son de altura invariable y están provistos de una pieza sujeta por dos tornillos que permiten fijar rígidamente el ejemplar (7) a la base (1). Los otros dos soportes (3) son, en cambio, de altura variable, que se gradúa con un tornillo que puede observarse en la figura. Es posible así que estos dos soportes sean puestos

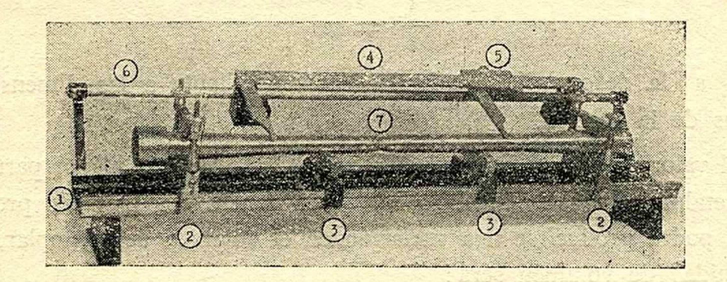


Fig. 19

al nivel exacto para que los dos trozos de la barra ensayada queden perfectamente en contacto. La regla (4) graduada en mm. y provista del nonio (5) que se puede deslizar a lo largo de una varilla cilíndrica (6), para ser colocada en la posición que en cada caso convenga, permite que las deformaciones sean medidas con la aproximación de 0.1 mm.

Este aparato, si bien no ofrece nada que pueda ser considerado como original, resulta en cambio muy útil al permitir que un solo operador haga cómodamente la apreciación del alargamiento de ruptura y también de la estricción, utilizando este último caso un calibrador o un palmer.

Contracción transversal — Simultáneamente con el alargamiento originado por la fuerza de extensión, se produce — como ya lo hemos expresado — en el caso de un metal, una disminución en la sección transversal de la barra.

La sección primitiva ω_0 se transforma en ω_1. La disminución de sección o sea la contracción tranversal se expresa en tanto por ciento; será por consiguiente igual a:

$$\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_0} \times 100$$

Aqui, como en los alargamientos, hay que distinguir entre las deformaciones elásticas y las deformaciones permanentes. Las experiencias demuestran que existe una relación entre las deformaciones lineales elásticas producidas en el sentido longitudinal y en el sentido transversal de la barra. Mientras no se excede el límite de elasticidad proporcional, esta relación que se conoce generalmente por el *módulo de Poisson* está dada por:

$$\frac{i}{\varepsilon} = m$$

siendo ε la deformación unitaria correspondiente a las dimensiones lineales de la sección.

El valor de m está comprendido entre 3 y 4 para la mayor parte de los metales. En estas condiciones, o sea dentro del período proporcional, podrá producirse una variación en el volumen del ejemplar, que por unidad de volumen será:

$$(1 - \varepsilon)^2 (1 + i) - 1$$

o lo que es igual:

$$(1 - \frac{i}{m})^2 (1 + i) - 1$$

La contracción transversal, como los alargamientos, se produce de una manera uniforme en toda la longitud de la barra hasta que empieza a producirse la estricción, o sea hasta el momento en que se registra el valor máximo del esfuerzo de extensión. A partir de este momento la deformación transversal se localiza.

Estricción. — Al localizarse la deformación se produce en uno o más puntos una contracción extraordinaria, o extrangulamiento, que se denomina generalmente *estricción* (fig. 20) y que conduce finalmen-

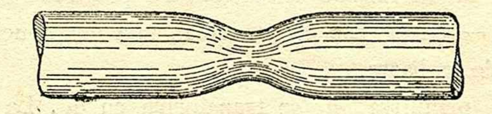


Fig. 20

te a la rotura, en el lugar donde la deformación ha alcanzado un máximo, que depende del material en ensayo. La definición y el valor de la estricción están dados por la fórmula:

$$Q = \frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0} \times 100$$

La superficie de la sección de fractura ω_2 debe ser medida con la mayor exactitud que sea posible.

Si la barra fuera de sección circular se tomará como diámetro d_2 el promedio entre las magnitudes de dos diámetros perpendiculares entre sí.

En las barras de sección rectangular se puede medir la superficie tomando las medidas necesarias para aplicar la fórmula de Simpson:

$$\omega_2 = \frac{b}{6} (h_1 + 4h_2 + h_3)$$

en la que b, es el ancho de la barra, h_1 y h_3 los espesores en los extremos y h_2 el espesor en el centro de la sección de rotura.

S. Gerszonowicz ha observado que la definición actual de la estricción es ilógica, pues al decir estricción se piensa en "escurrimiento local", de suerte que Q debería ser igual a cero — lo que no resulta de la fórmula — en los ejemplares que no presentan escurrimiento local. Con el fin de subsanar esta objeción propone que se introduzca un nuevo coeficiente que se denominaría "índice de escurrimiento" y que estaría representado por:

$$Q_1 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

Este coeficiente caracterizaría mejor la estricción pues se tendría $Q_1 = O$ cuando no exista escurrimiento y $Q_1 = 1$ para la rotura en punta.

Tanto la medida de alargamiento de rotura como la determinación de la contracción transversal y principalmente de la estricción permiten apreciar la ductilidad del material pero las dos últimas presentan la ventaja de no estar influídas por las cabezas de los ejemplares, ni por las mordazas de la máquina de ensayo, y de no variar con la ubicación de la sección de fractura. Ofrece en cambio el inconveniente de que no es una medida fácil y cómoda y está sujeta a probables errores debidos a esta circunstancia.

Trabajo de deformación. — Todo cuerpo elástico está sujeto a la acción de fuerzas interiores que admiten un potencial y un estado natural de equilibrio.

Cuando actúa sobre el cuerpo una fuerza exterior cualquiera se crea un nuevo estado de equilibrio y el cuerpo conserva en estado latente una energía potencial igual al trabajo que deberán desarrollar las fuerzas interiores para alcanzar nuevamente su estado natural de equilibrio, una vez desaparecida la fuerza que modificó dicho estado. Esta energía es la que se llama *trabajo de deformación.*

Sea una barra de longitud L_o en la que una fuerza de extensión produjo un alargamiento l. Para producir esta deformación fué necesario un trabajo T. El trabajo elemental estará dado por la extensión:

$$dT = P\, dl$$

en la que P es función de la deformación. El trabajo total será:

$$T = \int_0^l P\, d\, l$$

que referido a la unidad de volumen será igual a:

$$T_u = \frac{1}{L_o\, \omega_o} \int_0^l P\, d\, l$$

El valor T_u, obtenido de esta expresión se llama *trabajo unitario de deformación o trabajo específico de deformación.*

Dentro del período elástico el trabajo producio por una fuerza P_o menor que el límite de proporcionalidad, será:

$$T_o = \int_0^{l_o} P\, dl$$

siendo l_o la deformación correspondiente a P_o. Pero como en el período proporcional:

$$\frac{P}{P_o} = \frac{l}{l_o}$$

tendremos que:

$$T_o = \frac{P_o}{l_o} \int_0^{l_o} l dl$$

y:

$$T_o = \frac{P_o \; l_o}{2}$$

Reemplazando a P_o y l_o por sus valores

$$P_o = p \, \omega_o \text{ y } l = i \, L_o$$

tendremos:

$$T_o = \frac{p \; \omega_o \; i \; L_o}{2}$$

y por unidad de volumen:

$$T_u = \frac{p \, i}{2}$$

En el caso del valor máximo de P_o, es decir cuando fuera igual al límite de proporcionalidad, la fórmula anterior expresaría el módulo del trabajo elástico proporcional.

Observando los diagramas de las figs. 9 y 10 vemos que el trabajo total de deformación durante el período proporcional está representado por el área del triángulo $O \; P \; P_1$.

Fuera de este período, como también en el caso de los materiales que no siguen la ley de Hooke, la integración directa de la ecuación de trabajo no es posible. En consecuencia, para apreciar su valor hay que medir directamente el área del diagrama, lo que puede hacerse fácilmente con un planímetro.

Prácticamente se ha observado que la relación

$$\triangle = \frac{\textit{área del diagrama}}{\textit{área del rectángulo circunscripto}}$$

varía para un mismo material dentro de límites muy próximos. En consecuencia podrá prescindirse en la mayoría de los casos de la medida directa del área del diagrama. Es suficiente aplicar la fórmula:

$$T = \triangle \; P_m \; l_m$$

P_m representa la ordenada correspondiente al esfuerzo máximo y l_m la abscisa correspondiente al alargamiento total registrado.

Es evidente que el valor de $\triangle$ será en todos los casos inferior a la

unidad. Una vez determinado $\triangle$ para cada material puede pues calcularse rápidamente, por medio de la fórmula anterior, el trabajo de deformación en todos los ensayos que se hagan sobre ejemplares de ese mismo material. Los resultados así obtenidos serán sólo aproximados, pero pueden en general aceptarse sin inconvenientes para las aplicaciones corrientes. En cambio, se evita tener que trazar un diagrama para cada ensayo, pues basta con anotar la carga máxima que es registrada por la máquina de ensayo y medir el alargamiento permanente de rotura.

El trabajo totalmente absorbido por una barra ensayada a la extensión puede considerarse como integrado por dos sumandos. El primero, que denominaremos *T'*, corresponde al período limitado por la carga máxima y que en la fig. 21 se halla representado por *W'*; el segundo

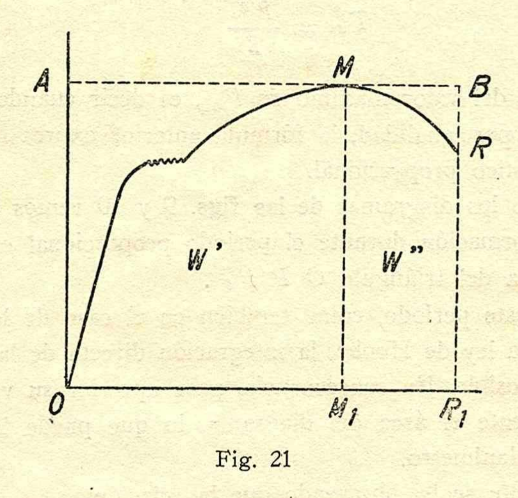


Fig. 21

T", corresponde el período situado entre la carga máxima y la carga real de rotura, que en la figura está señalado con la letra *W"*.

El trabajo *T'* se distribuye en todo el volumen útil del ejemplar, es decir, en la extensión registrada en el diagrama. El trabajo *T"* es absorbido solamente por la parte de barra influída por la estricción. En consecuencia puede sin inconveniente determinarse los valores de $\triangle'$ y $\triangle''$, llamando así a las relaciones entre las áreas *W'* y *W"* y las superficies de los rectángulos circunscriptos respectivos.

El trabajo específico de deformación correspondiente a la parte de barra de deformación uniforme será por consiguiente:

$$\frac{T'}{\omega_0 L_0}$$

y el trabajo específico en la parte influída por la estricción, cuyo volúmen llamaremos V_e, será igual a:

$$\frac{T'}{\omega_0 \ L_0} + \frac{T''}{V_e}$$

Costuras longitudinales. — En los ensayos de metales a la extensión se observa algunas veces la producción de una serie de pequeñas grietas normales al eje de la barra. Estas grietas se denominan *costuras longitudinales.*

Se explica este hecho por la existencia de alguna fibra cuya ductilidad es menor que la del resto del material y que al no admitir una deformación paralela a la de las demás fibras se rompe en diferentes puntos originando dicho fenómeno.

La formación de esas fibras puede tener por origen la existencia, en el lingote primitivo, de ciertos núcleos duros que a consecuencia de las operaciones de laminado o de estirado en la hilera se alargan formando fibras que no admiten el mismo alargamiento que las restantes.

Líneas de Hartmann. — Si durante un ensayo a la extensión se examina atentamente el aspecto externo de la barra se observan algunos hechos que pueden ser de interés en el estudio de la forma en que se produce el deslizamiento de unas partículas sobre las otras mientras se deforma el ejemplar.

Si se tratara, por ejemplo, de una barra de hierro, cubierta por una delgada capa de calamita, se observará que ésta empieza a desprenderse desde el instante en que se llega al límite de elasticidad aparente. Este hecho es motivado por los distintos grados de ductilidad de esa capa y del metal y por la relativamente pequeña adherencia entre ambos.

Una barra de acero de sección rectangular y de pequeño espesor, perfectamente pulida, permite estudiar con mayores detalles la marcha de la deformación. Se verá, en primer término, que la superficie primitivamente brillante de la barra comienza a empañarse. Enseguida toma un aspecto ligeramente granulado para dar lugar inmediatamente después a la formación de una serie de líneas o pequeños pliegues que forman un cierto ángulo con el eje de la barra. Estas líneas son

llamadas: líneas de Lüders y también líneas de Hartmann, en recuerdo del coronel francés de este nombre, que efectuó una larga e importante serie de experiencias con diferentes metales, llegando a conclusiones de cierto interés. Entre otras se pueden citar las siguientes. Una vez excedido el límite de elasticidad aparecen bruscamente sobre las dos caras de una lámina de poco espesor, dos sistemas conjugados de deformaciones rectilíneas paralelas. Estas líneas, una vez formadas aumentan poco a poco de ancho. El paralelismo de las líneas indica que la dirección de las acciones moleculares es independiente del valor del esfuerzo. La estricción se producen en la parte donde existen más líneas de los dos sistemas. Cualquiera que sea el largo, ancho o espesor del ejemplar, el ángulo de los dos sistemas es invariable. Este ángulo depende sólo del material. El aumento de la velocidad del ensayo disminuye el número de líneas, pero no modifica su orientación. No obstante, debe hacerse notar que algunos autores como Frémont sostiene, basado en experiencias efectuadas personalmente, que la formación de estas líneas se debe a defectos de la colocación del ejemplar en la máquina de ensayo, los cuales tendrían como resultado la existencia de un cierto ángulo entre la dirección del esfuerzo de extensión y el eje de la barra.

De acuerdo con esta conclusión las leyes deducidas por Hartmann perderían todo su valor.

Coeficiente de calidad. — En el deseo de establecer una cierta relación o compensación entre las diferentes características de un material, se ha propuesto el empleo de ciertos coeficientes que se conocen generalmente con el nombre de *coeficientes de calidad.*

Entre los diferentes coeficientes de calidad que se han incluído en pliegos de condiciones se puede citar como más conocidos los siguientes:

Coeficiente de Tetmajer — Es el producto de la tensión por el alargamiento por ciento.

$$C = p\ \delta$$

Coeficiente de Wöhler — Es la suma de la tensión y la estricción:

$$C = p + Q$$

Coeficiente de Wöhler (reformado) — Es la suma de la tensión y el alargamiento por ciento:

$$C = p + \delta$$

Coeficiente de Dormus — Es el producto del cuadrado de la tensión por el alargamiento por ciento:

$$C = p^2 \delta$$

Estos coeficientes pueden representarse gráficamente por una hipérbola equilátera, rectas inclinadas y una hipérbola cúbica correspondiente a las expresiones anteriores, (fig. 22).

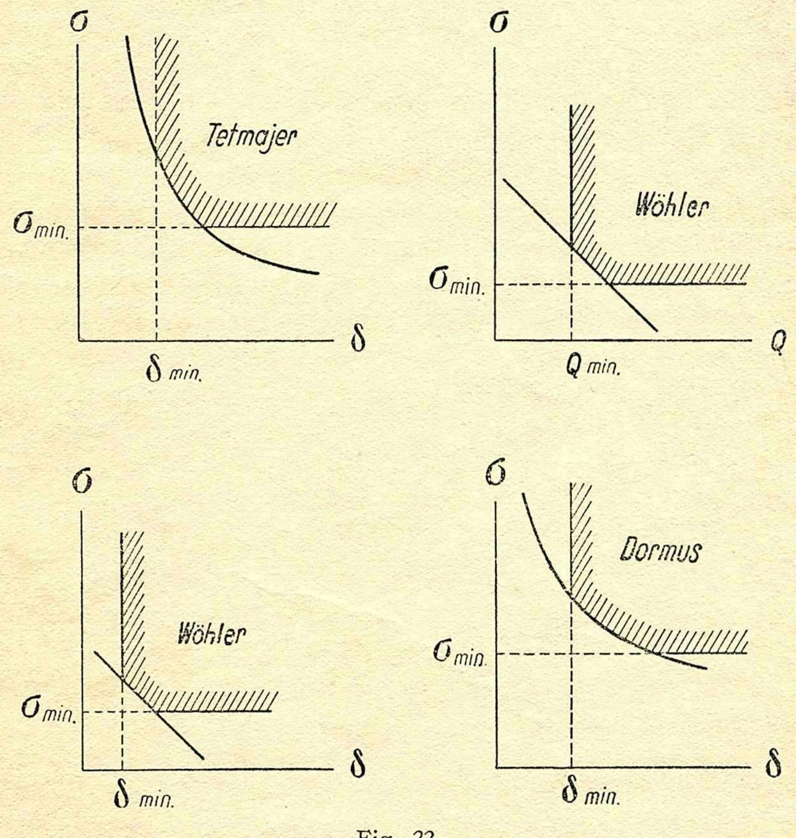


Fig. 22

El empleo de los coeficientes de calidad si no es completado con la fijación de mínimos para cada uno de los valores que intervienen en su formación, presenta el grave inconveniente de que admite el uso de materiales de condiciones muy desiguales.

La tendencia actual no es favorable a la utilización de los coeficientes de calidad, considerándose preferible exigir para las distintas características de cada material límites mínimos.

En los ensayos los metales corrientes se refieren generalmente a:

a) Límites aparentes de elastticidad.
b) Resistencia a la extensión.
c) Ductilidad.
d) Estricción.

CAPITULO IV

ENSAYOS A LA COMPRESION

Introducción. — Las mismas razones que nos movieron a dar preferencia a los metales, en el caso de los ensayos a la extensión, nos inclinan ahora, con motivo de los ensayos a la compresión, a considerar principalmente las piedras, sean naturales o artificiales.

Por lo demás, así como puede decirse que el ensayo a la extensión es el ensayo clásico en el caso de los metales, el ensayo a la compresión reviste el mismo carácter en el caso de las piedras.

Diagramas. — Si sobre un sistema de ejes coordenados tomamos como abscisas las deformaciones y como ordenadas las cargas aplicadas, obtendremos un diagrama que presentará una parte rectilínea — en el caso de que exista en el material ensayado un período proporcional — continuada por una curva que variará en cada caso. Esta curva ten-

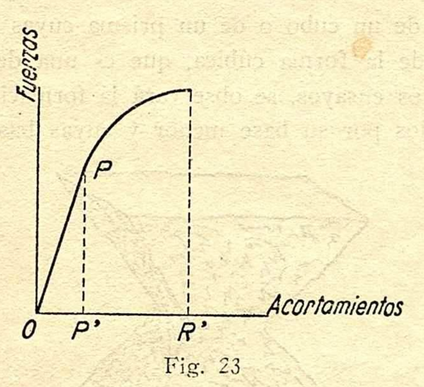


Fig. 23

drá una caída brusca (fig. 23) si el material admite una rotura a la compresión o luego de una inflexión (fig. 24) continuará casi indefinidamente cuando el material continúe deformándose sin romperse.

Cuando se trate de materiales que no ofrezcan un período proporcional no existirá evidentemente la parte rectilínea y el diagrama estará constituído en toda su extensión por una curva.

Estos diagramas permiten medir el trabajo de deformación, los

distintos límites similares a los que consideramos al tratar los ensayos a la extensión, etc.

Denominaremos presión al cociente de dividir la carga aplicada por la superficie de la sección transversal del cuerpo.

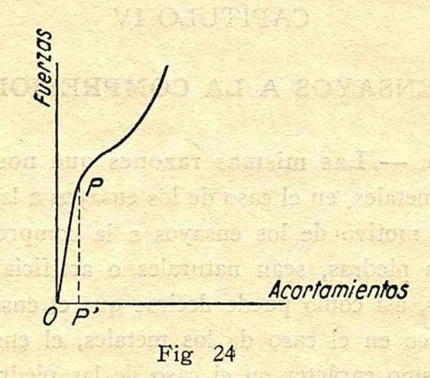


Fig 24

Forma en que se produce la rotura de una piedra. — La rotura de ciertos cuerpos quebradizos, tales como las piedras, los hormigones, etc., a consecuencia de un esfuerzo de compresión, se produce no como un verdadero aplastamiento sino como un corte, que produce el deslizamiento de una parte del cuerpo en el instante en que la carga alcanza cierto valor, característico de cada material.

Si se tratara de un cubo o de un prisma cuyas dimensiones no lo apartaran mucho de la forma cúbica, que es una de las generalmente adoptadas para estos ensayos, se observará la formación de dos troncos de pirámides unidos por su base menor y cuyas bases mayores serían

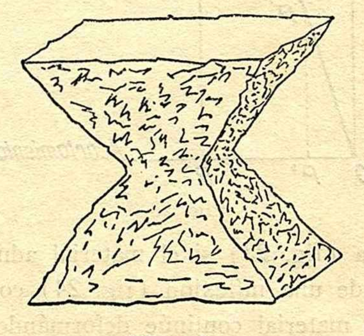


Fig. 25

las dos bases del ejemplar puestas en contacto con los platos de prensa. La fig. 25 indica esta forma de fractura. Cuando se aumenta suficientemente la altura del prisma se obtiene la formación de dos pirá-

mides que pueden hallarse o no — según sea la altura — unidas por sus vértices.

En el caso de ejemplares cilíndricos tendríamos en lugar de troncos de pirámides o pirámides, troncos de conos o conos. Este fenómeno se explica teniendo en cuenta que la fuerza resultante de la combinación de la carga aplicada y la resistencia al rozamiento producida entre las caras del cuerpo puestas en contacto, tiene necesariamente que seguir una dirección oblicua, en la que se produce el corte o rotura por deslizamiento, una vez que dicha resultante ha vencido la cohesión del cuerpo, según los planos que han de constituir luego las caras laterales de los troncos de pirámides.

Si no existiera la fuerza constituída por la resistencia al rozamiento, la rotura se produciría en forma muy distinta. En efecto, el esfuerzo de compresión originaría entonces un aumento en la sección transversal del cuerpo que, por pequeño que fuese, bastaría por el hecho de tratarse de cuerpos no dúctiles, para dividir al ejemplar en una serie de prismas o agujas verticales. Puede comprobarse este hecho sometiendo a la rotura por compresión, cubos de vidrio o cristal, después de haber engrasado, para eliminar todo rozamiento, las caras puestas en contacto con los platos de la prensa. En estas condiciones la rotura se produce en la forma antedicha, es decir, según planos verticales.

Forma que deben tener los ejemplares de ensayo. — En el Congreso de Bruxelas se acordó que "las superficies de los ejemplares deben ser lo más planas posibles, paralelas entre sí y normales al eje que debe pasar por su centro. Es conveniente usar la forma cúbica. Cuando no pueda obtenerse una sección cuadrada, se procurará que la longitud L del cuerpo tenga por valor:

$$L = \sqrt{\omega}$$

siendo ω el área de la sección transversal."

No obstante los ejemplares de forma cilíndrica presentan prácticamente, mayores ventajas por no tener las partes débiles que ofrecen generalmente las aristas y por tener todos los puntos de su superficie equidistantes del eje. Presentan en cambio el inconveniente de que son más difíciles de tallar que los prismáticos o cúbicos. Esta circunstancia merece ser tenida especialmente en cuenta cuando se trata de piedras duras, hormigones ya endurecidos, etc.

En el ensayo de hormigones preparados en el laboratorio, se opta

generalmente por la forma cilíndrica, de altura igual al doble del diámetro.

Las dimensiones de los ejemplares debe ser determinada de acuerdo con la naturaleza del material y con la potencia de la máquina en que deban ser ensayados, pero es conveniente, a los efectos de la mayor regularidad de los resultados que sean lo más grandes posible, pues de este modo se disminuye la influencia de los pequeños defectos o faltas locales de homogeneidad.

Influencia de las superficies de contacto. — La dureza y el grado de pulimento de los platos de la prensa, que trasmiten el esfuerzo de compresión al ejemplar cuya resistencia se quiere determinar, tienen una gran influencia sobre los resultados del ensayo. Este hecho puede ser fácilmente comprobado. Es suficiente para ello interponer entre los platos de una de las prensas que se usan para la ejecución de esta clase de ensayos y las bases del ejemplar, láminas de diferentes materiales; plomo, caucho, corcho, cartón, madera, etc.

Se observará así que cuanto más plástica sea la materia intercalada tanto menor resultará la resistencia del cuerpo. Además la rotura se producirá en distinta forma. La materia interpolada, que actúa en forma de cuña entre los granos salientes del cuerpo — por más pequeños que estos puedan ser, conforme al mayor o menor grado de pulimento — al rellenar los huecos que existirán en la superficie del cuerpo, lo dividirán en una serie de prismas verticales, que se irán desprendiendo sucesivamente con cargas cada vez menores y sin producir el estrépito que caracteriza la rotura de los cuerpos no dúctiles.

La disminución de resistencia, cuando se emplea una lámina de plomo, puede llegar hasta un 50 %. En consecuencia, se recomienda que al efectuar los ensayos a la compresión, se prepare cuidadosamente los ejemplares, dando a sus bases un grado tal de pulimento que haga innecesaria — a los efectos de la mejor distribución de la carga sobre toda la superficie del cuerpo — el uso de ningún material auxiliar. Sin embargo, la colocación de una hoja de cartón muy delgada, o una ligera capa de pasta de cemento o de yeso, no ofrece ningún inconveniente y puede resultar muy útil cuando sea difícil pulir debidamente las caras del cuerpo.

Influencia de la forma de los ejemplares. — Hemos visto como el Congreso de Bruxelas resolvió en 1906, que la forma más conve-

nientes para los ejemplares destinados a los ensayos a la compresión, es la cúbica.

De los trabajos efectuados por muchos investigadores, especialmente Bauschinger, se deduce que la resistencia unitaria no varía — para un mismo material — cuando se opera sobre ejemplares cúbicos, cualquiera sea su lado, a condición, no obstante, de que no sean demasiado pequeños, porque en este caso podrían influir demasiado sobre los resultados los defectos provenientes de las faltas de homogeneidad que caracterizan en general a todos los materiales de construcción.

Para dos primas de la misma sección la resistencia es menor en el de mayor altura, dentro de cierto límite que varía con la naturaleza del material. Se observa también que a igualdad de altura y de área en la base son más resistentes los ejemplares de forma cilíndrica que los de forma prismática.

Bauschinger expresó en una fórmula los resultados de sus investigaciones y las de Soupflot, Perronet, Rondelet, Vicat, Perrodel, etc., respecto a la resistencia unitaria de las piedras. Esta fórmula es la siguiente:

$$R = \left(a_o + a_1 \frac{\sqrt{\omega}}{h}\right) \sqrt{\frac{4\sqrt{\omega}}{p}}$$

en la que a_o y a_1 son dos constantes de cada material; ω el área de la base del ejemplar; p el perímetro de la misma; y h la altura del ejemplar. Debe cumplirse también la condición $h < 5\sqrt{\omega}$. Si el ejemplar fuera de base cuadrada se tendría:

$$R = a_o + a_1 \frac{a}{h}$$

y si fuera de forma cúbica:

$$R = a_o + a_1$$

Johnson estableció una fórmula para comparar la resistencia de prismas y cubos, que es aplicable para relaciones de la altura al ancho de la base variables entre 0.4 y 5; límites entre los cuales realizó sus ensayos. La fórmula es la siguiente:

$$\frac{\text{Resistencia del prisma}}{\text{Resistencia del cubo}} = 0.778 + 0.222 \frac{h}{b}$$

en la que b es la mínima dimensión de la base y h la altura.

Los ensayos de hormigones se efectúan frecuentemente, como hemos expresado antes, sobre ejemplares cilíndricos de altura igual al doble del diámetro. Es útil conocer la relación existente entre las presiones de rotura correspondientes a ejemplares cúbicos y a dichos ejemplares cilíndricos. De los ensayos efectuados en el Instituto de Ensayo de Materiales se deduce que esa relación varía entre 1.3 y 1.4. El promedio de todos los resultados parciales resultó igual a 1.33. Debe tenerse presente que los resultados de las experiencias efectuadas en los laboratorios de ensayo de materiales se refieren a ejemplares comprimidos entre los platos de una prensa, sin interposición de ninguna materia elástica o plástica.

En la práctica puede ocurrir, — con el empleo de morteros que unen entre sí ladrillos, trozos de piedra, etc. — por demora en el fraguado y endurecimiento de dichos morteros, — que los materiales trabajen en malas condiciones. El mortero podría influir, en tales circunstancias en la misma forma que la capa de materiales elásticos o plásticos a que nos hemos referido. Es preciso, por consiguiente, considerar este factor para no incurrir en errores cuyas consecuencias podrían ser graves.

Ensayo de ejemplares constituídos por uno o por varios trozos. — Se han efectuado experiencias para determinar si los resultados obtenidos serían los mismos en el caso de estar el ejemplar constituído por uno o por varios trozos. Vicat. Bauschinger y otros investigadores estudiaron detenidamente este punto.

Vicat, en expreriencias sobre cubos de yeso llegó a la conclusión de que la resistencias variaban en la siguiente forma:

Para cubos formados de un solo trozo	100
" " " " dos trozos (prismas)	94
" " " " cuatro trozos (prismas)	89
" " " " ocho trozos (cubos)	88

En estos ensayos, los trozos que constituían el ejemplar no se unían entre sí por medio de ningún otro material.

Es interesante también, el estudio de la influencia que ejerce sobre

los resultados, el uso de algunos de los materiales que se emplean habitualmente para unir entre sí a distintos trozos de un mismo material.

Según las experiencias de Burchartz, si se designa por 100 la resistencia de un ejemplar cúbico constituído por dos medios ladrillos unidos con una pasta de cemento, la resistencia será de:

100, si se emplea un mortero de cemento portland 1:3,

100, si los dos trozos perfectamente pulidos se ponen simplemente en contacto,

83, si se interpone una capa de cemento en polvo,

78, si se emplea un mortero de cal,

77, si se interpone una capa de arena fina y húmeda,

73, si se interpone una capa de arena fina seca.

El espesor de la junta ejerce también influencia sobre los resultados. La resistencia aumenta cuando disminuye el espesor. Si se emplea mortero de cal es preciso tener en cuenta que si la parte interna no se ha endurecido en la misma forma que las externas, puede ocurrir que los trozos del ejemplar trabajen a la flexión, en cuyo caso la resistencia resultaría disminuída.

Resistencia de las piedras cargadas parcialmente. — Interesa saber si la resistencia unitaria de una piedra, cuando la carga actúa sobre toda la superficie de sus bases, es la misma que cuando se aplica solamente sobre una parte de ellas.

Con el propósito de resolver este punto se han ejecutado numerosos ensayos, llegándose a la conclusión de que el valor de la presión de rotura no varía mayormente por el hecho de que la carga esté localizada en una parte de las bases del cuerpo.

Así, por ejemplo, si se colocan sobre un cubo A de base S, superior e inferiormente otros dos cubos B de base s (fig. 26), se comprobará que la rotura se produce en el instante en que la carga aplicada sobre los cubos B alcanza un valor P, equivalente al que sería necesario para romper un prisma de base s y de la misma altura que el cubo A.

Resulta por consiguiente que — mientras la diferencia de áreas S y s no sea demasiado grande — la cantidad de material que rodea al prisma situado entre los cubos B no ejerce influencia de importancia en la presión de rotura del material de que está formado el cubo A. No obstante, según Bach, en el caso de un cubo cargado parcialmente sobre sus bases, la presión de rotura referida al área S sería igual a la

resistencia cúbica multiplicada por $\sqrt{\frac{S}{s}}$

Otras experiencias debidas a Durand Claye y a Flamant han demostrado que la presión de rotura, en una piedra cargada parcialmente sobre una zona central limitada, puede resultar aumentada en algunos casos hasta en un 10 %.

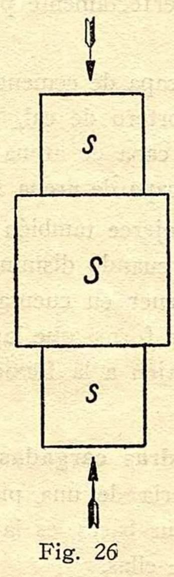


Fig. 26

Ensayos a la compresión de cuerpos dúctiles. — Hasta aquí nos hemos referido al caso de las piedras ensayadas a la compresión, teniendo en cuenta que se trata del ensayo fundamental para esta clase de materiales. Es conveniente, sin embargo, estudiar también la forma como se comporta un cuerpo dúctil al ser comprimido entre los dos platos de una prensa.

En estas condiciones se observará muchas veces que no llega a producirse la fractura. El cuerpo sigue aplastándose hasta convertirse en una lámina cuya altura será tanto menor cuanto más perfecto sea el pulido de los platos de la prensa y cuanto mayor sea la carga P aplicada al ejemplar.

Puede estudiarse la manera como se produce la deformación de un cuerpo dúctil efectuando la siguiente experiencia. Se dispone, uno sobre otro, varios discos de un metal dúctil, por ejemplo plomo, o de una misma materia, por ejemplo arcilla, pintadas con distintos colores y se aplica al conjunto una carga de compresión suficiente para producir una

deformación bien apreciable. Se observará, haciendo una sección vertical que pase por el eje del ejemplar, luego de terminado el ensayo, que el ejemplar ha tomado la forma de un tonel y que los dos discos extremos tienen una forma plano-convexa, el central biconcava, los intermedios cóncavo-convexa. Se reconoce de este modo que el material ha sido rechazado desde el interior hacia el exterior en las diferentes capas.

El volumen de cada uno de los discos es el mismo al final que al principio de la experiencia, siempre que se haya operado sobre un material compacto. Esta experiencia explica también la forma de tonel tomada por el ejemplar.

La rotura — en el caso de producirse — se manifiesta por una serie de grietas que siguien generalmente direcciones oblicuas con respecto al eje del ejemplar. Estas grietas son originadas por la resultante entre el esfuerzo de compresión y el de extensión, que se desarrolla como consecuencia de la deformación del ejemplar, a condición, no obstante, de que esa resultante alcance un valor suficiente para vencer la resistencia ofrecida por la cohesión de la materia al deslizamiento de unas partículas sobre las otras.

En ciertos casos, cuando la deformación progresa muy rápidamente, las grietas pueden producirse siguiendo una dirección vertical. Si no llega a vencerse la fuerza de cohesión, el cuerpo seguirá aplastándose hasta convertirse en la lámina a que nos referimos antes.

Ensayo de ladrillos. — Las conclusiones mencionadas con respecto a los resultados obtenidos al romper por compresión cubos formados por uno o por varios trozos unidos o no entre sí por medio de otras materias, y las indicadas para el caso en que la carga actúa únicamente sobre una parte de las bases del cuerpo, se aplican principalmente cuando se trata de determinar la resistencia a la compresión de los ladrillos. El procedimiento que se indica a continuación es el que se sigue generalmente en todos los laboratorios.

Se corta el ladrillo, con una sierra, en dos mitades, que se reúnen luego por su cara mayor por intermedio de una muy delgada capa de pasta de cemento portland. Se tiene entonces un ejemplar de forma casi cúbica.

Para obtener que las dos bases de los ejemplares así formados resulten perfectamente planas y paralelas se les coloca sobre una mesa bien plana entre dos tablas colocadas verticalmente y cuyos bordes

superiores deben ser paralelos a la superficie de la mesa. Las dos tablas son firmemente comprimidas contra los ejemplares. El borde superior de las mismas debe exceder entre cm. 0.5 y cm. 1. de la superficie superior de los ladrillos. Se coloca en seguida sobre estos, previamente bien mojados, una capa de pasta de cemento portland que se alisa con una regla recta que se hace deslizar apoyándola sobre los bordes de las dos tablas. Una vez terminado el fraguado se invierte los ejemplares y se prepara la otra base de la misma manera.

Luego de fraguada la segunda base y luego de suficientemente endurecida se procede a ejecutar el ensayo. Para ello se coloca simétricamente sobre el ejemplar una plancha metálica de sección cuadrada de 10 cm. de lado — o de una dimensión equivalente a la altura del ejemplar, si se tratara de ladrillos especiales — y de unos diez milímetros de espesor.

El esfuerzo de compresión es aplicado a esta plancha que, a su vez, lo trasmitirá el ejemplar. De acuerdo con lo que hemos expresado antes, la rotura se producirá cuando la carga aplicada alcance el valor necesario para romper el cubo de ladrillo situado debajo de la placa.

Este mismo procedimiento, de preparar las bases de los ejemplares formados con las dos mitades de ladrillos, puede emplearse también cuando se tiene ejemplares de piedra cuyas bases no sean perfectamente lisas. Se evita así tener que pulir las piedras.

Ensayos de hormigones. — Los ensayos de hormigones se efectúan sobre ejemplares de forma cúbica o cilíndrica. Cuando se usan cubos, hay ventajas en que sean de las mayores dimensiones, compatibles con la potencia de la máquina de que se disponga. Los cubos pequeños conducen muchas veces a resultados contradictorios. En la actualidad se prefiere como hemos expresado anteriormente y por la razón que expondremos enseguida efectuar los ensayos sobre ejemplares cilíndricos, de altura igual al doble del diámetro. Este diámetro no debe ser menor de cuatro veces la mayor dimensión del agregado grueso. Siendo posible se aconseja el uso de cilindros de veinte centímetros de diámetro y de cuarenta centímetros de altura. En la generalidad de los casos — como se utiliza agregados de pequeñas dimensiones — puede emplearse cilindros de quince centímetros de diámetro y de treinta centímetros de altura, que ofrecen la ventaja de su menor peso y por consiguiente la facilidad para la toma de muestras en las obras y su transporte al laboratorio.

El ángulo de rotura a la compresión es — en los hormigones — de aproximadamente 60 grados con la base. En consecuencia, para que sea posible la formación completa de los dos conos, es necesario que la altura sea por lo menos igual a 1.73 veces el diámetro. Tal el motivo por el que se ha establecido la altura igual al doble del diámetro.

Los ensayos efectuados en varios laboratorios bajo la dirección de la "American Concrete Institution" demuestran las variaciones que experimenta la resistencia cuando se hace variar la relación entre la altura y el diámetro. Cuando esta relación supera a dos— y mientras no se produzca el efecto de pandeo — la resistencia unitaria varía muy poco, pero cuando es inferior a dos aumenta sensiblemente.

Ensayo de piedras naturales. — Por las razones que hemos indicado antes, la determinación de la resistencia a la compresión se efectúa, generalmente en este caso, sobre ejemplares de forma cúbica.

Ensayo de maderas. — La determinación de la resistencia de las maderas a la compresión se hace generalmente sobre ejemplares prismáticos de sección cuadrada y de altura igual a vez y media el lado de la sección. Se aplica el esfuerzo en la dirección de las fibras. En el sentido normal a las fibras no se produce muchas veces la fractura sino un aplastamiento muy grande del ejemplar. De todas maneras, aún cuando luego de esa gran deformación se produzcan algunos agrietamientos, la determinación de un límite de rotura presentaría dificultades de mucha entidad.

El ángulo de rotura a la compresión es — en los hormigones — de aproximadamente 60 grados con la base. En consecuencia, para que sea posible la formación completa de los dos conos, es necesario que la altura sea por lo menos igual a 1,73 veces el diámetro. Tal el motivo por el que se ha establecido la altura igual al doble del diámetro.

Los ensayos efectuados en varios laboratorios bajo la dirección de la "American Concrete Institution" demuestran las variaciones que experimenta la resistencia cuando se hace variar la relación entre la altura y el diámetro. Cuando esta relación supera a dos — y mientras no se produce el efecto de pandeo — la resistencia unitaria varía muy poco, pero cuando es inferior a dos aumenta sensiblemente.

Ensayo de piedras naturales. — Por las razones que hemos indicado antes, la determinación de la resistencia a la compresión se efectúa generalmente en este caso, sobre ejemplares de forma cúbica.

Ensayo de maderas. — La determinación de la resistencia de las maderas a la compresión se hace generalmente sobre ejemplares prismáticos de sección cuadrada y de altura igual a vez y media el lado de la sección. Se aplica el esfuerzo en la dirección de las fibras. En el sentido normal a las fibras no se produce muchas veces la fractura sino un aplastamiento muy grande del ejemplar. De todas maneras, aún cuando luego de esa gran deformación se produzcan algunos agrietamientos, la determinación de un límite de rotura presentaría dificultades de mucha entidad.

CAPITULO V

ENSAYOS A LA FLEXION

Introducción. — Las fórmulas que se determinan en el estudio de la resistencia de los materiales, para calcular los esfuerzos sufridos por las distintas fibras de un cuerpo sometido a la flexión, se basan en una serie de hipótesis, establecidas en el supuesto de que los esfuerzos no excedan, en ningún caso, del límite de proporcionalidad.

Estas hipótesis son:

a) Las fuerzas exteriores que actúan sobre el cuerpo se reducen en cada sección a un par.

b) Las fibras de que se supone compuesto el cuerpo no ejerce entre sí ninguna acción.

c) Las secciones primitivamente planas y perpendiculares al eje de la pieza, continúan siendo, durante la deformación, planas y perpendiculares a dicho eje.

d) El módulo de elasticidad a la extensión y a la compresión son iguales y constantes.

Como dice Martens, la simplicidad de las fórmulas de que se trata, es causa de que se las aplique muchas veces, al efectuar ensayos de materiales, como si fuesen válidas hasta la rotura o hasta el período de las grandes deformaciones. No obstante, es necesario tener en cuenta los errores en que pueda incurrirse al proceder así.

Por otra parte, de un completo y detenido estudio hecho por Bach, resulta que, si bien en la práctica tales hipótesis no se cumplen de una manera rigurosa, pueden sin embargo ser aceptadas, a condición de que se ejecuten los ensayos de manera que los esfuerzos de flexión se desarrollen, en lo posible, sin perturbaciones, y que se adopten disposiciones sencillas y se utilicen ejemplares en formas simples. Podrá de esta manera compararse de inmediato los resultados obtenidos por observadores o por laboratorios distintos.

Procedimientos de ensayo. — Los procedimientos generalmente usados, por los motivos que acabamos de expresar, consisten en:

a) colocar el ejemplar sobre dos apoyos y aplicar una fuerza aislada en su centro.

b) colocar el ejemplar sobre dos apoyos y aplicar dos cargas concentradas iguales, que disten respectivamente $\frac{L}{3}$ y $\frac{2L}{3}$ de cada uno de los apoyos, siendo L la luz. Este procedimiento fué establecido para los ensayos de hormigones por la A.S.T.M. en su norma C-78-44.

c) empotrar el ejemplar por uno de sus extremos y aplicar la fuerza aislada en el otro.

La sección del ejemplar es generalmente un cuadrado, un rectángulo o un círculo. Sin embargo, es necesario muchas veces, ensayar piezas de perfiles tales como: *T*, doble *T*, *U*, etc.

Se fabrican también máquinas de ensayo para ensayar vigas y placas sometidas a la acción de varias fuerzas aisladas, de cargas uniformemente repartidas, etc.

Todas las máquinas empleadas en los ensayos de flexión permiten registrar la carga máxima alcanzada durante la experiencia, la flecha de rotura, etc. Existen además dispositivos para el trazado de diagramas análogos a los que hemos considerado anteriormente para los ensayos de extensión y compresión. En estos diagramas las ordenadas representan las cargas aplicadas y las abscisas las flechas respectivas. Se dispone también de instrumentos especiales para apreciar con la mayor precisión los valores de las cargas y las flechas correspondientes.

Los datos que se determinan al efectuar ensayos a la flexión son principalmente los que siguen:

a) Límite de proporcionalidad.
b) Límite de elasticidad o límite elástico proporcional.
c) Límite de elasticidad aparente.
d) Carga de rotura.
e) Flecha proporcional.
f) " elástica.
g) " de rotura.
h) Módulo de elasticidad.

No nos ocuparemos, en detalle, de lo relativo a las siete primeras determinaciones, por cuanto los métodos a seguir no varían, en lo fundamental, de los indicados para los ensayos a la extensión. Por otra par-

te, los estudiantes efectúan las experiencias pertinentes en las clases prácticas que se dictan en los laboratorios del Instituto.

Sólo cabe observar, en lo que atañe a la carga de rotura, que, en muchos casos, a causa de la gran ductilidad del material, el ejemplar se pliega — sin romperse — hasta tomar la forma de U. Al final de este capítulo trataremos lo relativo a este punto, es decir lo que corresponda al ensayo de plegado.

Módulo de elasticidad. — Se demuestra en Resistencia de Materiales que en el caso de un viga de longitud L apoyada en dos puntos y cargada con una fuerza concentrada P en su punto medio, siendo I el momento de inercia de la sección y E el módulo de elasticidad del material, la flecha tiene el valor que resulta de la siguiente fórmula:

$$f = \frac{1}{48} \cdot \frac{P L^3}{E I}$$

Si se tratara, como ocurre frecuentemente, de una viga de sección rectangular de base b y altura h:

$$I = \frac{b h^3}{12}$$

y por consiguiente:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \frac{P L^3}{E b h^3}$$

de donde se deduce:

$$E = \frac{P}{f} \cdot \frac{L^3}{4 b h^3}$$

Ahora bien: $\frac{L^3}{4 b h^3}$ está determinado por las condiciones del ensayo: distancia entre apoyos y dimensiones de la sección, los valores de P y de f son determinados en el ensayo. P por el dispositivo medidor de las cargas y f por los aparatos de medida respectivos. No habrá en consecuencia dificultad alguna para calcular el valor de **E**. En el procedimiento de ensayo que hemos designado con la letra b el valor de la flecha está dado por expresión:

$$f = \frac{23}{648} \cdot \frac{P\,L^3}{E\,I}$$

De manera análoga se procede en los demás casos que pudieran presentarse, ya se trate de piezas apoyadas o empotradas, de cargas concentradas o de cargas uniformemente repartidas. Igualmente habrá que calcular el valor del momento de inercia si se tratara de perfiles especiales.

Ley de similitud — *Dos vigas de forma geométrica semejante y de igual material, sostenidas de la misma manera y cargadas en la misma forma, exigen, para flexiones semejantes, cargas proporcionales a sus secciones.*

Supongamos que se trata de dos cuerpos A y A_1 de secciones rectangulares geométricamente semejantes. Todos los valores relativos al primero se indican sin índice y los correspondientes al segundo con el índice *1*. Pueden establecerse las siguientes relaciones:

a) *Dimensiones*:

$$\frac{L}{L_1} = \frac{b}{b_1} = \frac{h}{h_1} = \frac{1}{n}$$

b) *Superficies*:

$$\frac{b\,h}{b_1\,h_1} = \frac{1}{n^2}$$

c) *Momentos de inercia*:

$$\frac{I}{I_1} = \frac{1}{n^4}$$

Consideramos que las deformaciones serán semejantes cuando se cumple la condición:

$$\frac{f}{L} = \frac{f_1}{L_1} \qquad (1)$$

pues entonces:

$$\frac{f}{f_1} = \frac{L}{L_1} = \frac{1}{n}$$

Para la primera viga, suponiendo el caso de la pieza apoyada por sus dos extremos y con una carga concentrada en su punto medio, se tendrá:

$$\frac{f}{L} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P L^2}{E I} \qquad (2)$$

y para la segunda, en las mismas condiciones de ensayo:

$$\frac{f_1}{l_1} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P_1 L_1^2}{E I_1}$$

es decir, de acuerdo con las relaciones anteriormente establecidas:

$$\frac{f_1}{L_1} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P_1 L^2 n^2}{E I n^4} = \frac{1}{48} \cdot \frac{P_1 L^2}{E I} \cdot \frac{1}{n^2} \qquad (3)$$

De acuerdo con la condición establecida por la expresión (1) y los valores correspondientes a las expresiones (2) y (3):

$$\frac{P}{P_1} = \frac{1}{n^2}$$

Por consiguiente las deformaciones serán geométricamente semejantes cuando las cargas estén en la relación $\frac{1}{n^2}$, vale decir cuando sean proporcionales a las superficies de las secciones, pues como hemos visto antes:

$$\frac{1}{n^2} = \frac{b h}{b_1 h_1}$$

Cumplidas estas condiciones tendrán el mismo valor las tensiones en ambas vigas. Sabemos que, para este caso de flexión:

$$p = \frac{P L}{4} \frac{y}{I}$$

y

$$p = \frac{P_1 L_1}{4} \frac{y_1}{I_1}$$

como

$$\frac{y}{y_1} = \frac{1}{n} \quad \text{y} \quad \frac{P}{P_1} = \frac{1}{n^2}$$

será

$$p = \frac{P\,n^2 L\,n\,y\,n}{4\,I\,n^4} = \frac{P\,L}{4} \cdot \frac{y}{I}$$

es decir:

$$p = p_1$$

La experiencia enseña que la ley de similitud puede ser aplicada, con bastante aproximación, aún en el período de las deformaciones permanentes. No obstante, la falta de homogeneidad, característica de todos los materiales de construcción, es motivo de que a pesar de llenarse completamente las exigencias de la ley de similitud, los resultados no se ajusten estrictamente en todos los casos a lo que ella establece.

Ensayos de plegado. — Como expresamos antes, el ensayo de flexión — en el caso de materiales suficientemente dúctiles — puede terminar en un ensayo de plegado. Se trataría entonces de un ensayo tecnológico.

El ensayo de plegado debe ser efectuado por medio de una máquina que trabaje por acción lenta y progresiva. (C. de B. — 1906).

Los ensayos se ejecutaban, primitivamente, sobre un yunque, empleando tenazas para sostener el ejemplar y martillos para obligarlo a plegarse según los ángulos prescriptos en las especificaciones correspondientes.

Es indudable que ensayos efectuados en tal forma podían conducir a resultados distintos cuando fueran ejecutados por distintos operadores. De ahí la necesidad de establecer, como único medio de llegar a resultados concordantes, que los ensayos se efectúen siempre con máquinas que permitan realizarlos en todos los casos en condiciones absolutamente iguales.

"Pueden efectuarse de dos maneras: *a*) la máquina ejerce una presión en la mitad de la barra colocada sobre dos apoyos; *b*) la máquina opera por presión lateral sobre la barra fijada sólidamente por uno de sus extremos".

"El ejemplar puede ser plegado: 1.°) Libremente alrededor de un

cilindro (caso anterior *a*) o de la mordaza (caso anterior *b*). 2.º) Obligándolo a adaptarse exactamente sobre un cilindro en forma tal que la cara interior del ejemplar se ajuste completamente a la superficie del cilindro". (C. de B. - 1906).

En todos los casos debe fijarse el diámetro de las superficies cilíndricas, teniendo en cuenta la naturaleza del material. Generalmente este diámetro se hace igual a un múltiplo exacto del diámetro o del espesor del ejemplar.

Dimensiones de los ejemplares para el ensayo de plegado. — "Los ejemplares de sección rectangular tendrán en general un ancho cuádruple del espesor".

"En el caso de barras perfiladas se procurará en lo posible que se conserven las dimensiones de la sección. Las aristas en la parte media de los ejemplares deberán ser redondeadas". (C. de B. - 1906).

Medida de la calidad. — En los ensayos de plegado la fractura se inicia — cuando llega a vencerse la ductilidad del material — en la cara opuesta a la colocada en contacto con la superficie cilíndrica que ha servido de directriz durante la experiencia, es decir, la correspondiente a las fibras extendidas. La ductilidad de estas fibras puede servir como medida para apreciar la calidad del material.

Supongamos que se trata de la barra *A B* (fig. 27) sometida a

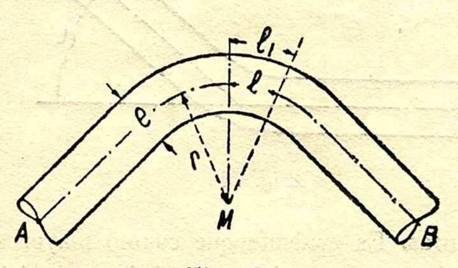


Fig. 27

un ensayo de plegado. El alargamiento experimentado por las fibras más extendidas, para una longitud inicial $l = 1$, puede ser expresado en función del radio de curvatura r y del espesor del ejemplar e.

En efecto:

$$\frac{l_1}{l} = \frac{r + \frac{e}{2}}{r}$$

o

$$a = \frac{l_1 - l}{l} = \frac{e}{2r}$$

"En los ensayos de plegado, la calidad del material puede ser apreciada por la relación existente entre el espesor del ejemplar y el radio de curvatura de la fibra neutra según el cual puede plegarse el material sin agrietarse".

"Se usa como coeficiente para apreciar la calidad el valor:

$$C = 50\frac{e}{r}$$

"La medida del radio de curvatura puede hacerse, con precisión suficiente, por medio de plantillas que se aplican sobre la cara convexa del ejemplar. Los radios de las plantillas deben variar de dos en dos milímetros. La abertura de las mismas debe ser de 45°". (C. de B. - 1906).

Se ha propuesto también como medida de calidad el mayor valor del ángulo de plegado α (fig. 28) que puede obtenerse sin que se produz-

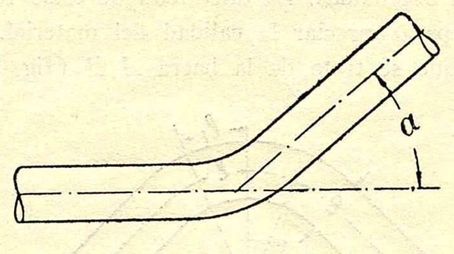


Fig. 28

can grietas o fracturas. Es evidente que cuanto mayor sea el valor de este ángulo tanto más extensa será la zona deformada del ejemplar. Será posible, de este modo, verificar en óptimas condiciones si existen en los ejemplares puntos débiles que puedan producir la fractura.

Este procedimiento ha sido incluído en las normas del Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, de la A.S.T.M., del I.R.A.M., etc.

Ensayos en frío y en caliente. — "Los ensayos de plegado pueden ejecutarse en las siguientes condiciones:

"a) Sobre los metales en el estado en que son suministrados. En este caso conviene cortar el ejemplar en frío y en lo posible

de manera que no sufra deformación alguna, (sin ayuda de tijeras).

"b) Después de recocido. Se realiza este tratamiento conforme a las propiedades particulares del metal. El hierro a unos 800°C, es decir al rojo claro, después se deja enfriar lentamente. El cobre a 600°C o 700°C como máximo; se le deja enfriar hasta la desaparición del rojo y después se le sumerge en agua cuya temperatura será de 15°C aproximadamente.

"c) Después de templado. Se calienta el ejemplar a unos 800°C y se le enfría en seguida agitándolo dentro de agua cuya temperatura estará comprendida entre 15°C y 18°C.

Los ensayos de plegado en frío se hacen a la temperatura ambiente (10°C a 30°C) o a temperaturas inferiores a 0°C obtenidas artificialmente.

Los ensayos de plegado en caliente pueden ser hechos sobre ejemplares calentados al azul o al rojo.

En el primer caso la temperatura a obtenerse es la que resulte suficiente para colorar en azul una parte del ejemplar pulido con la lima. Cuando la temperatura deseada no fuera alcanzada no se observará una coloración francamente azul y cuando hubiera sido excedida la coloración se obscurecerá hasta volverse casi negra.

En el segundo caso los ejemplares deben calentarse suficientemente para que examinados en la sombra aparezcan claramente rojos alrededor de los 600°C". (C. de B. - 1906).

Otros ensayos de plegado. — Los ensayos de plegado pueden efectuarse también sobre barras en las que previamente se haya hecho una incisión, un agujero, etc.

El objeto de estos ensayos es hacer más severas las condiciones de las experiencias. Se trata, en efecto, de concentrar todo el esfuerzo en una zona muy reducida del ejemplar, poniendo de esta manera a prueba la resistencia del material en una forma tan rigurosa como es posible.

"La incisión se realiza sobre el lado exterior del ejemplar por medio de un cepillo cuya herramienta debe tener sus filos formando aproximadamente un ángulo recto. La incisión tendrá como profundidad los dos décimos del espesor del ejemplar.

Los agujeros serán hechos, en lo posible, en la parte céntrica de ejemplares cuya ancho sea el quíntuplo del espesor. El punzón que se utilice tendrá un diámetro igual al doble del espesor del ejemplar". (C. de B. - 1906).

CAPITULO VI

ENSAYOS AL CORTE

Procedimientos de ensayo. — Los ensayos al corte pueden efectuarse en diferentes formas. Las más usadas son las siguientes:

I) El ejemplar *CD* de forma cilíndrica de sección ω va colocado

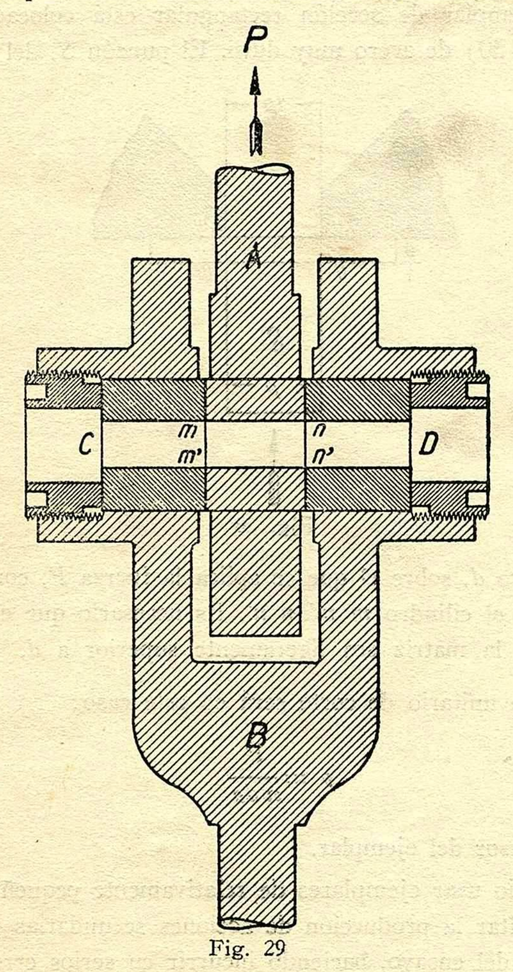


Fig. 29

en forma de pasador a través de dos piezas *A* y *B* representadas en la fig. 29. La rotura se produce por la aplicación de la carga *P* que actúa

sobre la pieza *A* y que tiende a separarla de la *B*, que permanece fija. El esfuerzo unitario de corte se calcula dividiendo la fuerza total *P* por la suma de las dos superficies *mm'* y *nn'*. Por consiguiente, si *d* es el diámetro del ejemplar, el esfuerzo unitario será:

$$p = \frac{P}{2\frac{\pi d^2}{4}}$$

II) El ejemplar de sección rectangular está colocado sobre una matriz *M* (fig. 30) de acero muy duro. El punzón *S*, del mismo mate-

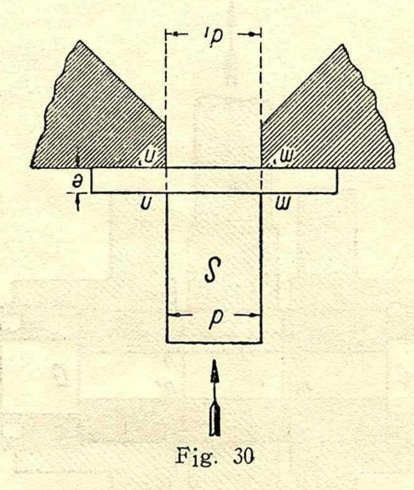


Fig. 30

rial, de diámetro *d*, sobre el que se aplica la fuerza *P*, cortará el ejemplar separando el cilindro *m m' n n'*. Es necesario que el diámetro d_1 del agujero de la matriz sea ligeramente superior a *d*.

El esfuerzo unitario de corte será en este caso:

$$p = \frac{P}{\pi de}$$

siendo *e* el espesor del ejemplar.

Es necesario usar ejemplares de relativamente pequeño espesor con el objeto de evitar la producción de acciones secundarias que perturbarían la marcha del ensayo, haciendo incurrir en serios errores.

Por otra parte, si se usaran ejemplares de mucho espesor podría suceder que en lugar de producirse el corte se originara el aplasta-

miento del material situado bajo el punzón. Si llamamos P como antes a la carga aplicada, la presión p_1 alcanzará el valor:

$$p_1 = \frac{P'}{\frac{\pi d^2}{4}}$$

Para que se produzca la rotura por corte es necesario que en ningún caso el esfuerzo p necesario para producir el corte, resulte inferior al valor p_1, capaz de producir el aplastamiento del metal.

Es fácil deducir — admitiendo que la resistencia al corte es apro-

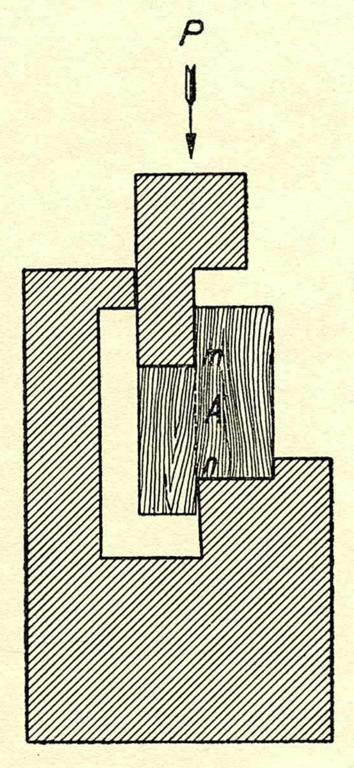


Fig. 31

ximadamente igual a los 4/5 de la resistencia a la compresión — que la condición $p > p_1$ se cumplirá cuando:

$$e < \frac{5}{16} d$$

III) El ejemplar A de la forma indicada en la fig. 31 se coloca en el dispositivo representado en la misma fig. 31. La fuerza aplicada P será aumentada gradualmente hasta obtener la rotura según el plano $m\ n$, cuya superficie llamaremos S. El esfuerzo unitario de corte será entonces:

$$p_1 = \frac{P}{S}$$

Este procedimiento, que se emplea principalmente en el caso de ensayo de las maderas, está incluído en normas de la A.S.T.M. y otras.

CAPITULO VII

ENSAYOS A LA TORSION

Procedimientos de ensayo — La experiencia demuestra que la hipótesis fundamental de la teoría de la torsión, vale decir que las secciones del ejemplar, primitivamente planas, siguen siéndolo después de deformado, se cumple exactamente en los casos de secciones circulares, no así en los de secciones cuadradas, rectangulares, etc. Por consiguiente, los ejemplares que se usan para los ejemplares de torsión son siempre barras de sección circular.

Para relizar los ensayos se utiliza generalmente máquinas en las que el ejemplar se fija sólidamente por uno de sus extremos a un péndulo, de manera tal que el eje del ejemplar coincida exactamente con el eje de rotación del péndulo. En el otro extremo del ejemplar se aplica el par de torsión. La utilización del péndulo responde a la necesidad de medir en forma fácil y segura, durante todo el ensayo, el valor del momento de torsión.

Es indispensable que el ejemplar se halle sometido exclusivamente al esfuerzo de torsión, evitándose cuidadosamente el desarrollo de cualquier esfuerzo secundario que influiría sobre la exactitud de los resultados.

La manera de fijar el ejemplar varía con el tipo de máquina que se emplee, así como también — en su caso — la forma que debe darse a la cabeza de los ejemplares para hacer posible su exacta colocación.

Las máquinas están provistas además de dispositivos para registrar exactamente los ángulos de torsión, los valores del momento de torsión y las variaciones en la longitud del ejemplar durante el ensayo. Es posible trazar un diagrama en el que las ordenadas representan los valores del momento de torsión y las abscisas las deformaciones medidas en grados y fracciones y en rotaciones y fracciones de rotación.

El sistema de coordenadas resultantes no puede ser rectangular por no hallarse fijo el extremo del ejemplar unido al péndulo. Teniendo en cuenta las características de la máquina es fácil determinar el valor del ángulo que forman entre sí dos ejes.

Examinando el diagrama se observará una parte rectilínea que corresponde al *período proporcional*, continuada por una parte curva que termina en el punto correspondiente a la fractura. En el caso de materiales muy dúctiles la parte curva puede convertirse en una línea casi recta y paralela al eje de las abscisas. Como en los demás ensayos mecánicos puede generalmente comprobarse la existencia de un período elástico.

Módulo de elasticidad transversal — Las fórmulas que se determinan en el estudio de la resistencia de los materiales permiten calcular el valor de esta constante. Si tenemos una barra de diámetro *d*, de longitud *L*, en la que la aplicación de un momento de torsión *M* ha originado un ángulo total de torsión α_1 (expresado en grados), el valor del módulo de elasticidad transversal resulta de la aplicación de la fórmula:

$$G = 583.6 \frac{M\ L}{d^4\, \alpha_1}$$

Esfuerzo unitario de corte dentro del período proporcional — Como el caso anterior, las fórmulas de resistencia de materiales permiten calcular el valor del esfuerzo unitario que produce el corte del ejemplar; su valor será el obtenido aplicando la fórmula:

$$p_1 = 5.09 \frac{M}{d^3}$$

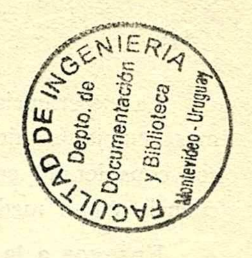
Fracturas — La fractura, a consecuncia de un esfuerzo de torsión, se produce según una línea helicoidal, contenida en un plano aproximadamente normal al eje de la pieza. Se inicia en la superficie del cuerpo y continúa hacia el interior. Presenta un punto característico que parece ser el eje de rotación y que no siempre coincide exactamente con el eje del ejemplar. Influye en esta separación la no perfecta coincidencia del eje del ejemplar con el eje de rotación del péndulo y las faltas de homogeneidad del material.

Ensayo de alambres — En el caso especial de los alambres, el ensayo de torsión es una prueba tecnológica destinada a apreciar la ductilidad del material. En tal carácter se determina solamente el número de torsiones que puede soportar el material hasta su rotura.

Los ensayos se ejecutan con una máquina especial movida a mano.

La longitud útil de los ejemplares es, en general, de 20 cm. Según lo acordado en el Congreso de Bruxelas esa longitud no debe ser inferior a 75 veces el diámetro y se considera conveniente que sea igual a la correspondiente al ensayo de extensión.

Al efectuar el ensayo a la torsión es necesario — con el fin de evitar la producción de esfuerzos de flexión — que el ejemplar se halle tendido con una fuerza de extensión que no exceda del 10 % de la resistencia a la extensión.



CAPITULO VIII

ENSAYOS DE CHOQUE

Consideraciones generales — En los ensayos de que nos hemos ocupado en los capítulos anteriores, que se pueden agrupar bajo la denominación general de *ensayos por acción gradual*, la fuerza aplicada de valor inicial igual a cero, era aumentada lentamente hasta alcanzar un máximo determinado por la naturaleza del ensayo.

Ensayos por choque, por acción instantánea o por acción dinámica, son aquellos en que la fuerza es aplicada bruscamente, alcanzando su valor máximo en un espacio mínimo de tiempo. Influirá así sobre los resultados no una fuerza, sino un trabajo. Los ensayos por choque pueden efectuarse de manera que se produzca sobre el ejemplar una compresión, una extensión, una flexión, etc.

Trabajo específico de choque — Se llama así a la cantidad de trabajo absorbida por la unidad de volumen, en la parte del cuerpo influída por el choque. Si llamamos P al peso de la maza, A la altura de caída y V al volumen de la parte del cuerpo que absorbió el trabajo, aplicado, el trabajo específico de choque será:

$$T = \frac{P\ A}{V}$$

El trabajo aplicado $P\ A$ puede ser producido por un peso considerable cayendo de una altura muy pequeña o por un peso muy pequeño cayendo de una altura muy grande. Al ser igual en los dos casos el valor del trabajo parecería lógico que fuera también igual el efecto producido en el ejemplar. Sin embargo la experiencia demuestra que no siempre se obtiene este resultado. Generalmente la velocidad adquirida por la maza ejerce influencia en los resultados. Tampoco se obtiene los mismos efectos si la cantidad total de trabajo aplicado es obtenida con un solo golpe o con una serie de golpes consecutivos. Kich llamó *factor de rotura* al trabajo de choque específico necesario para romper el ejemplar con un solo golpe.

La experiencia demuestra que para un mismo material y para formas semejantes de los ejemplares, el valor del factor de rotura puede ser considerado como una cantidad constante y ser tomado en consecuencia como medida de su resistencia dinámica.

Ensayos a la compresión por choque — Estos ensayos se efectúan generalmente sobre ejemplares de forma cilíndrica cuya altura puede hacerse igual al diámetro o en los que se cumple la condición:

$$L = \sqrt{\frac{\pi\ d^2}{4}} = 0.886\ d$$

Los acortamientos se miden después de cada golpe de la maza.

Se llama *coeficiente de aplastamiento por choque* a la relación entre el acortamiento por unidad de longitud y el trabajo específico.

Puede trazarse un diagrama que represente gráficamente la marcha del ensayo. En este diagrama el efecto producido por cada golpe estará representado por un solo punto que corresponderá al estado del cuerpo después del choque. Las abscisas representarán los acortamientos totales después de cada golpe y las ordenadas los trabajos (fig. 32).

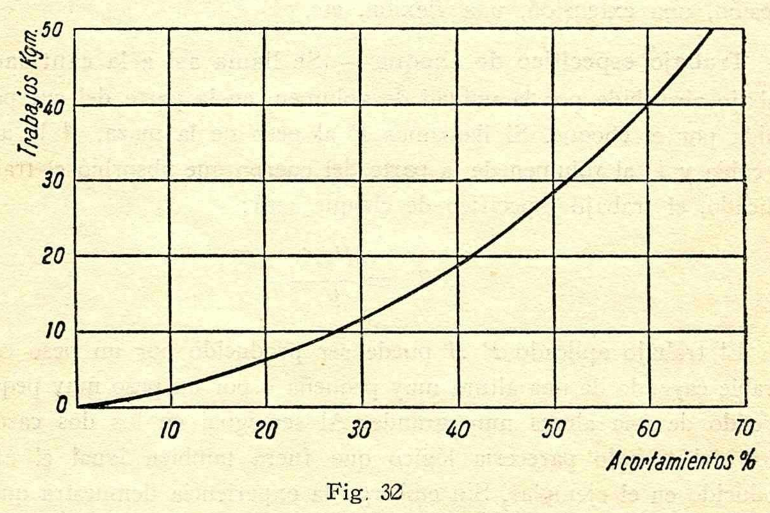


Fig. 32

Se denomina *coeficiente de rotura a la compresión por choque* al trabajo específico expresado en:

$$\frac{kg.\ cm.}{cm^3}$$

necesario para romper al ejemplar con un solo golpe, y en el caso de

no poderse producir la rotura, a consecuencia de la gran ductilidad del material, el trabajo necesario para producir un acortamiento preestablecido, por ejemplo 80 %.

Los cuerpos dúctiles al aplastarse toman la misma forma de tonel que en los ensayos a la compresión por acción gradual.

Ensayos a la extensión por choque — Desde las primeras experiencias a la extensión por choque efectuadas sobre hilos y barras metálicas fué dado comprobar que la fractura, el alargamiento y la estricción presentaban las mismas características que en el ensayo por acción gradual. Se pensó también que el trabajo absorbido por el material sería proporcional al volumen del ejemplar sometido al choque. Sin embargo algunos hechos contrariaban esta suposición. En el caso de barras no entalladas se halló que la relación entre el trabajo total y el volumen no era un valor constante sino que variaba al variar las dimensiones del ejemplar. En las barras entalladas tampoco era constante la relación entre el trabajo total absorbido y la superficie de la sección de fractura. Los ensayos efectuados en el Instituto de Ensayo de materiales demuestran acabadamente estos hechos. Así. por ejemplo, en ensayos sobre barras de un mismo acero, rotas a la extensión con un solo golpe, se obtuvieron los resultados que se indican en el siguiente cuadro: :

Diámetro (d) mm.	Longitud (l) mm.	Volumen (V) mm^3	Trabajo total absorbido (T) kg.mm.	Trabajo referido al mm^3 de Vol Kg. mm / mm^3
6	5	141.37	4512	31.91
6	10	282.74	6687	23.65
6	20	565.48	12062	21.33
6	40	1130.96	20975	18.54
6	60	1696.44	27475	16.19

En el caso de barras con entalladura circular de 1 mm. de radio, ejecutada en el torno, los resultados obtenidos sobre otra serie de barras también de un mismo acero, fueron los siguientes:

Diámetro de la barra mm.	Diámetro de la entalladura mm.	Superficie de la entalladura mm²	Trabajo total absorbido kg.mm.	Trabajo referido a la sección entallada kg.mm / mm²
10	8	50.26	11100	22.1
10	7	38.48	5350	13.9
10	6	28.27	2220	7.8
10	5	19.63	1200	6.1
10	4	12.57	520	4.1

Ante resultados tan discordantes nos propusimos estudiar experimentalmente la cuestión. Desde 1934 hasta 1937 efectuamos en el Instituto de Ensayo de Materiales más de mil ensayos que nos permitieron establecer una fórmula que expresa la cantidad de trabajo absorbido por la unidad de volumen en la parte del ejemplar influída por la solicitación dinámica.

Esta fórmula es la siguiente:

$$T_u = \frac{T}{\dfrac{\beta(d^3 + 2r^3)\left[(D-2d)^2 + Dd\right]}{(D + 1.5l)^2} + \left[\left(1 + \dfrac{l}{2d}\right)^{1/2} - 1\right]\pi d^3}$$

que fué comunicada oportunamente al Congreso de la Asociación Internacional de Ensayo de Materiales, reunido en Londres del 19 al 24 de Abril de 1937. Corresponde a ejemplares de la forma indicada en la

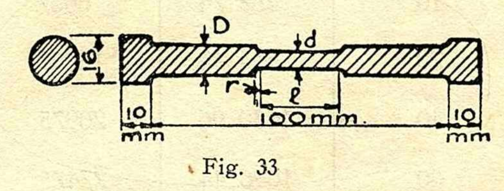


Fig. 33

fig. 33 confeccionados en el torno y rotos de un solo golpe de trabajo total T. en un martinete péndulo Amsler de 30 kg.m. cuando la longitud del ejemplar era inferior a 100 mm. y en un martinete vertical Amsler en el caso de ejemplares de mayor longitud. Todos los ejem-

plares ensayados cumplían la condición $d < 0.8\ D$ y $r > 0$. La fórmula se cumple satisfactoriamente en todos los ejemplares de metales o aleaciones no frágiles, vale decir. en los que se observa una fractura fibrosa (fractura por deslizamiento, *cassure a nerf*) cualesquiera que sean los valores l, d, D, y r, incluso para los de $d = 0$ (ejemplares entallados). El coeficiente β constituye una característica de cada material.

Las figuras 34 y 35 que representan gráficamente los resultados obtenidos en algunos de los ensayos efectuados sobre acero, latón y aluminio, demuestran la validez de la fórmula. La fig. 34 corresponde a

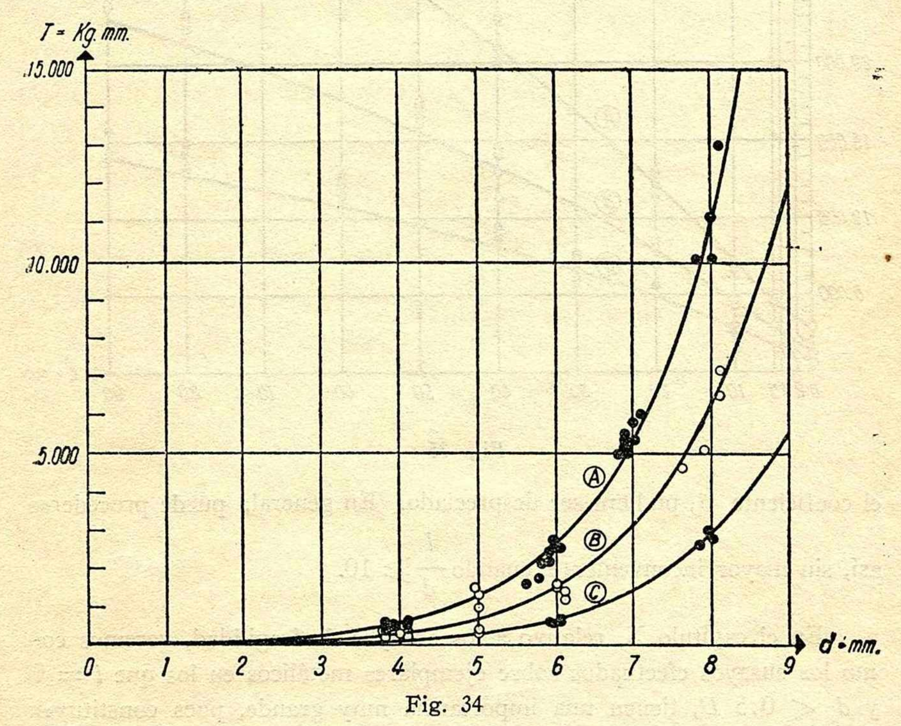


Fig. 34

ejemplares entallados $l = 0$ y la fig 35 a ejemplares en los que $l > 0$.

La fórmula permite calcular el trabajo de choque que produciría la la fractura de una pieza sometida, *en servicio*, a efectos dinámicos de extensión. Debe tenerse presente, a los efectos de ejecutar el número de ensayos necesario, que la falta de homogeneidad de los materiales ejerce, en los casos de las solicitaciones por choque, una influencia muy grande.

La determinación de los valores T_u y β requiere dos series de ensayos, una sobre ejemplares de $l = 10\ d$, por ejemplo, y la otra sobre

ejemplares entallados ($l = 0; 0.6\,D < d < 0.8\,D$).

Si interesara únicamente el valor T_u podría operarse sobre una sola serie de ejemplares, cuya longitud l fuera lo bastante grande, para que el primer término del denominador de la fórmula, donde figura

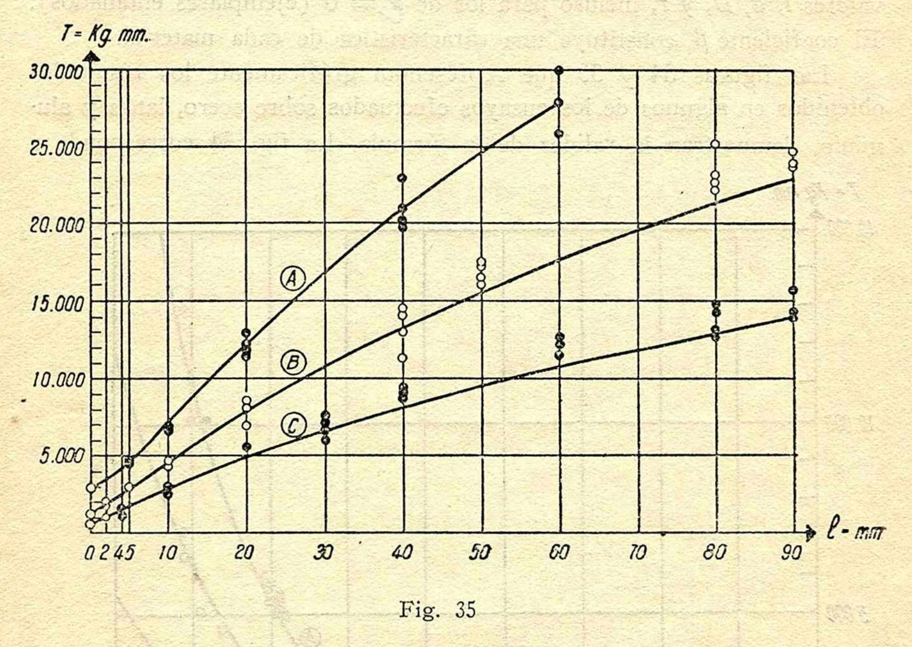


Fig. 35

el coeficiente β, pudiera ser despreciado. En general, puede procederse así, sin mayor inconveniente, cuando $\frac{l}{d} \geqslant 10$.

En el capítulo X, relativo a los ensayos de fragilidad, veremos como los ensayos efectuados sobre ejemplares metálicos en los que $l = 0$ y $d < 0.5\,D$, tienen una importancia muy grande, pues constituyen un *procedimiento muy apropiado para poner en evidencia la fragilidad del metal.*

Los dos procedimientos que se usan habitualmente en los ensayos de extensión por choque son: un dispositivo especial que transforma un choque de compresión, en extensión del ejemplar (aparatos Mohr y Federhaff; Stanto and Bairstow) y otro que consiste en dos mazas unidas por el ejemplar que las acompaña en la caída; al detenerse bruscamente la maza superior, obliga a la inferior a ejercer el esfuerzo de extensión (aparatos Amsler Laffon; Compañía P.L.M.; Conserva-

toire de Arts et Metiers; Hendrik Hatt; David Kirkaldy; péndulos Charpy, Amsler, etc.).

Ensayos a la flexión por choque — Este procedimiento de ensayo es uno de los más antiguos que se conocen. Se efectúa comúnmente disponiendo el ejemplar de sección prismática sobre dos apoyos y dejando caer la maza en su centro.

Se puede determinar: el trabajo necesario para romper el ejemplar con un solo golpe o el número de golpes iguales necesarios para producir la rotura o para originar una flecha permanente preestablecida. En este último caso puede trazarse una diagrama semejante al que hemos mencionado al tratar los ensayos a la compresión por choque.

Rohter, luego de efectuar una gran cantidad de ensayos a la flexión por choque, llegó a las siguientes conclusiones:

a) Los golpes violentos tienen por consecuencia una flexión más grande que un mayor número de golpes débiles cuya potencia total sea la misma. Esta conclusión es aplicable también a los ensayos a la compresión por choque.

b) Dado un mismo trabajo de choque por golpe, pero con distinta altura de caída, se produce una flexión mayor con la mayor altura de caída. Las fracturas se producen en la misma forma que en los ensayos por acción gradual.

Al efectuar ensayos a la flexión por varios choque sucesivos es preciso tener en cuenta que la parte de ejemplar que sobresale de los apoyos, si fuera excesiva, puede en algunos casos influir sobre los resultados. Esas partes, al principiar la deformación, permanecen atrasadas con respecto a la posición teórica que debieran tomar después del golpe que ha producido una cierta deformación de la parte del ejemplar entre apoyos. Posteriormente, a consecuencia de un golpe, dichas extremidades pasan bruscamente a una posición superior a las que les correspondería de acuerdo con la deformación del ejemplar. La importancia de esta acción de las extremidades varía con su longitud. Por esta razón se ha reglamentado en la generalidad de las normas la longitud total de los ejemplares y por consiguiente la parte que quedará fuera de los apoyos. Al tratar lo relativo a los ensayos de fragilidad (capítulo X) consideraremos lo relativo a los ensayos a la flexión por choque sobre barras entalladas.

CAPITULO IX

ENSAYOS DE FATIGA

Consideraciones generales — Ensayos de fatiga son aquellos en que los cuerpos están sometidos a la acción de fuerzas estáticas o dinámicas relativamente débiles, pero que se repiten un gran número de veces.

Se sabe que los materiales fracasan, a menudo, a consecuencia de la continuada repetición de los esfuerzos a que se encuentran normalmente sometidos en la práctica. Cargas relativamente débiles o choques de pequeña intensidad que aplicados una sola vez producirían deformaciones elásticas sin ninguna importancia, pueden provocar la rotura — en forma repentina y sin deformación permanente apreciable — cuando se repiten una número suficientemente grande de veces, de materiales que serían capaces, no obstante, de soportar sin inconveniente fuerzas estáticas de un valor mucho más elevado o un solo golpe de energía mucho más grande. Para juzgar la importancia de esta clase de esfuerzos bastará recordar con Aitchison que un 95 % de las piezas de automóviles y con Roos que el 80 % de las piezas de máquinas que se rompen durante su uso o funcionamiento, reconocen como causa de su fracaso la existencia de esfuerzos de fatiga.

En los ensayos de fatiga se procura colocar a los materiales en las mismas condiciones en que se encontrarán al integrar una estructura o una máquina. Se trata en consecuencia de aplicar solicitaciones de pequeño valor, pero repetidas una gran número de veces. Variando metódicamente la intensidad del esfuerzo se puede determinar el valor de la carga o el trabajo de choque máximo que el material ensayado es capaz de soportar sin que produzca la rotura, cualquiera que sea el número de solicitaciones. Es posible de este modo dar a las diferentes piezas las dimensiones precisas para que los esfuerzos máximos no excedan de los límites convenientes.

Este valor límite fué llamado por Wöhler: *resistencia en servicio;* por Tresca: *carga natural de rotura;* por Bauschinger: *límite elástico natural.* En Francia: *limite d'endurance.* En Gran Bretaña y en los

Estados Unidos de la América del Norte: *endurance limite* y *fatigue limite*. En la actualidad la designación más empleada es: *límite de fatiga*.

A fin de tener en cuenta la distinta naturaleza de los esfuerzos a que pueden estar sometidos los materiales, se efectúan ensayos de fatiga a la extensión, a la compresión, a la extensión y compresión alternadas, a la flexión en un plano, a la flexión rotativa, a la torsión, etc. Las propiedades de la materia y principalmente los límites de proporcionalidad y de elasticidad, varían cuando se somete el cuerpo a esfuerzos repetidos. Puede establecerse, en general, que si dichos esfuerzos se hallan comprendidos dentro de ciertos límites, las propiedades elásticas mejoran tanto en el caso de materiales dúctiles como en el de materiales frágiles. Esas modificaciones en las propiedades elásticas son más fácilmente comprobables, como es lógico, en los materiales dúctiles.

En el estudio de los efectos de la fatiga se consideran fundamentalmente cuatro casos:

1.° — *Fatiga por solicitaciones invertidas* — Los esfuerzos varían entre dos límites de igual valor numérico pero de diferente signo, por ejemplo: $+f_1$ y $-f_1$

2.° — *Fatiga por solicitaciones alternadas* — Los esfuerzos de diferente valor numérico cambian de sentido alternativamente, por ej.: $+f_1$ y $-f_2$.

3.° — *Fatiga por solicitaciones repetidas* — Los esfuerzos actúan siempre en el mismo sentido, variando entre cero y un máximo positivo o negativo. los valores extremos serán pues: O y $+f_1$ o O y $-f_2$

4.° — *Fatigas por solicitaciones onduladas* — Los esfuerzos tienen siempre el mismo sentido pero varían entre dos límites determinados. Los valores extremos serán por consiguiente: $+f_1$ y $+f_2$ o $-f_1$ y $-f_2$

En la fig. 36 están representados gráficamente los cuatro casos. Los ensayos de fatiga por choque corresponden al tercer caso: ensayos por solicitaciones repetidas.

Determinación del límite de fatiga — No sería posible, sin duda, la determinación precisa del límite de fatiga, si entedemos por tal el esfuerzo estático y el esfuerzo dinámico que puede repetirse indefinidamente sin causar la rotura. Prácticamente se resuelve la dificultad

adoptando como límite de fatiga el valor del máximo esfuerzo que puede repetirse sin inconvenientes un número convencional de veces. Este número se ha fijado por los distintos autores, en 1, 10, 30 o 100 millones de solicitaciones. De acuerdo con este criterio, el procedimiento generalmente seguido para determinar dicho límite consiste en aplicar a varias series de ejemplares, de idénticas dimensiones, del metal de ensayo, esfuerzos f_1, f_2, f_3, ... Se anota para cada uno de ellos — si se ha producido la rotura — el número de solicitaciones aplicado. En el caso de que después de aplicado el número máximo de solicita-

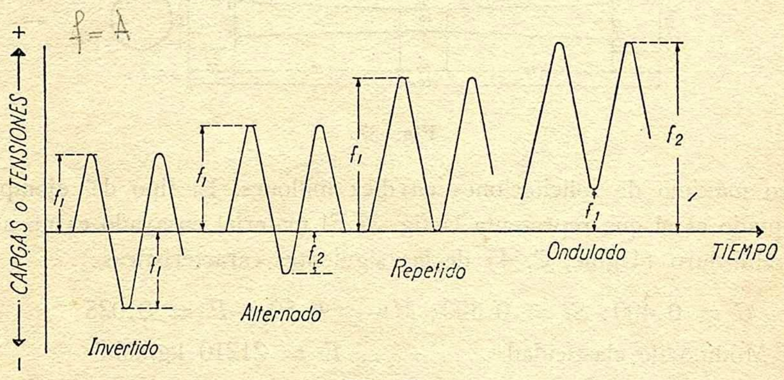


Fig. 36

ciones que, de acuerdo con lo recién expresado se hubiera fijado previamente, no se produjera la rotura, se considera como no excedido el límite de fatiga.

Para cada uno de los ejemplares integrantes de cada serie, el valor del esfuerzo aplicado será igual. Se inicia el ensayo con una carga lo suficientemente grande para producir la rotura y se continúa luego con cargas decrecientes. En consecuencia, el número de solicitaciones irá aumentando de una a otra serie, hasta alcanzar el valor máximo que puede aplicarse sin que se rompa el ejemplar. Si trazamos entonces un diagrama en el que las abscisas representen el número de solicitaciones y las ordenadas los valores de los esfuerzos, obtendremos la curva representativa del ensayo, en la que el límite de fatiga estará determinado por la asíntota horizontal.

De conformidad con lo que expresamos antes, la determinación del límite de fatiga puede hacerse por medio de ensayos a la extensión, a la compresión, a la flexión, a la torsión, etc. De todos estos ensayos, el que ha sido objeto de mayor cantidad de estudios e investigaciones

y el más utilizado en la práctica, por requerir máquinas relativamente sencilas, es el de flexión rotativa. Por estas circunstancias es muy corriente que al referirse a él, se diga instintiva y simplemente: ensayo de fatiga, como si en realidad se tratara de sinónimos.

Como ejemplo de un ensayo de fatiga a la extensión citaremos uno efectuado en el Instituto de Ensayo de Materiales con un pulsador Amsler. Este ensayo corresponde a un caso de fatiga por solicitaciones onduladas; la tensión límite inferior fué fijada en 2 kg/mm² y el nú-

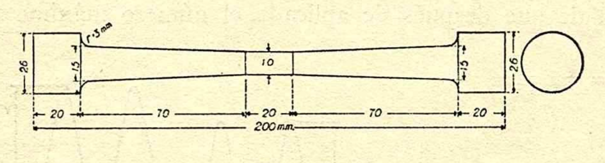


Fig. 37

mero máximo de solicitaciones en diez millones. El tipo del ejemplar adoptado es el que representa la fig. 37. El material ensayado es un acero semi-duro (Ugine, C. 4) de las siguientes características:

$C = 0.400$; $Si = 0.300$; $Mn = 0.50$ y $P = 0.025$

Módulo de elasticidad .... $E = 21210$ kg/mm²

Resistencia a la extensión ...... $R = 50.3$ "

Límite aparente de elasticidad ... $P = 31.$ "

Alargamiento de rotura { .... $A_{11.3} = 26.1$ %
{ .... $A_{5.65} = 33.4$ "

Resiliencia { .... $Km = 9.9$ kgm/cm²
{ .... $K_{ISA.} = 6.9$ kgm/cm²

Trabajo específico de choque único
a la extensión ($\beta = 0.75$) ...... $T = 28.8$ kg/mm²

Los diagramas de las figs. 38 y 39 corresponden al ensayo de fatiga efectuado. En el primero de éstos se ha representado a las tensiones como ordenadas y el número de ciclos como abscisas. En el segundo también están representadas las tensiones como ordenadas y el número de ciclos como abscisas, pero éstas en escalas logarítmica. En este se observa una parte recta e inclinada mientras no se ha alcanzado el límite de fatiga y otra parte aproximadamente horizontal luego. El punto de intersección de ambas rectas corresponde al límite de fatiga.

y se presenta casi siempre para los aceros entre 1 y 5 millones de ciclos.

Según Caquot, la tensión con que se produce la rotura al cabo de un millón de ciclos es siempre inferior al límite de fatiga correspondiente a 100 millones de ciclos aumentado en un 10 %.

En ciertas aleaciones, por ejemplo las de aluminio, la curva no se convierte en horizontal sino para un número de ciclos del orden de los 100 millones. En el caso de los aceros se puede aceptar, sin incon-

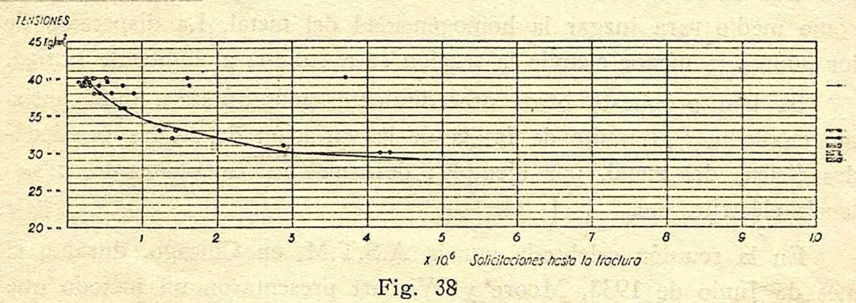


Fig. 38

veniente, un límite convencional comprendido entre 10 y 30 millones de ciclos. Cazaud y Persoz observaron que en todos los casos "es indispensable continuar la experimentación hasta el límite convencional

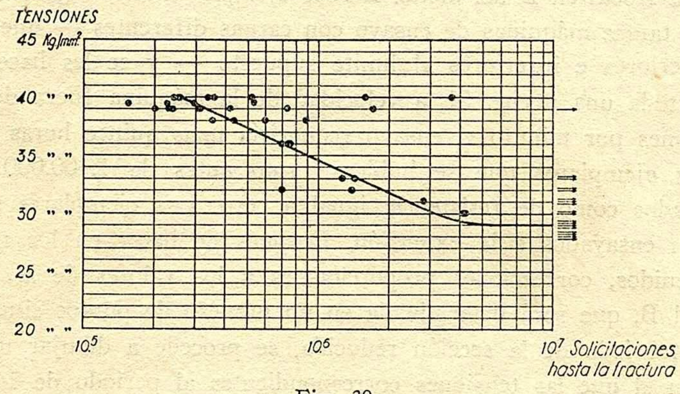


Fig. 39

que se hubiera establecido, pues las curvas pueden cortarse en sus partes inclinadas. Una clasificación de diferentes metales que se basara sobre el número de solicitaciones con que se produce la rotura bajo un esfuerzo determinado, sería totalmente ilusoria, para calificar los metales desde el punto de vista de su resistencia a la fatiga".

Cuando los puntos representativos de los resultados del ensayo aparecen dispersos o uno y otro lado de la curva de fatiga, el metal

debe ser tenido como poco homogéneo o con defectos internos. En cambio, cuando los puntos caen sobre la curva o muy próximos a ella, puede considerarse como homogéneo y sano.

Haigh comprobó, en efecto, que cuando el material reúne estas condiciones, los puntos se ubican sobre una línea y que en cambio, cuando contienen impurezas, se dispersan en una zona que se halla comprendida entre dos líneas. El ancho de esa zona podría ser utilizado como medio para juzgar la homogeneidad del metal. La dispersión de los puntos es menor cuando la tensión se aproxima al límite de fatiga.

Se han propuesto otros procedimientos más rápidos, que consisten en deducir el límite de fatiga de la variación de ciertas propiedades físicas del metal, por ejemplo: deformación, calentamiento, resistencia eléctrica, etc.

En la reunión celebrada por la A.S.T.M, en Chicago, durante el mes de Junio de 1933, Moore y Wishart presentaron un método que permite determinar rápidamente el límite de fatiga y que denominaron "ensayo de una noche". Consiste en operar sobre cinco o seis ejemplares de flexión rotativa, del metal en estudio. Previamente se determina la dureza Rockwell B del metal. Dichos ejemplares son luego colocados en otras tantas máquinas de ensayo con cargas diferentes — que deben ser superiores e inferiores al límite supuesto — y se les hace girar durante toda una noche. Si la velocidad de la máquina fuera de 1500 revoluciones por minuto el ensayo requeriría unas quince horas y media. Los ejemplares que se hubieran roto antes de 1.400.000 serán considerados como de resistencia igual a cero. Los ejemplares restantes serán ensayados a la extensión. Después de hacer en los resultados obtenidos, correcciones proporcionales a los valores de la dureza Rockwell B, que será determinada en un número de puntos situados a uno y otro lado de la sección reducida, se procede a dibujar un diagrama en el que las tensiones correspondientes al período de 1400000 ciclos se toman como ordenadas y las resistencias a la extensión después de este período como abscisas. El límite de fatiga será la ordenada correspondiente a la máxima abscisa de la curva. El ensayo se basa en el principio de que una vez excedido el límite de fatiga deben producirse en el material pequeñas grietas externas o internas que influirán sensiblemente sobre su resistencia, y que en el caso contrario, es decir, cuando la tensión es igual o inferior al límite de fatiga la resistencia a la extensión no habrá experimentado variación, o aún ha-

brá tenido algún pequeño aumento debido al efecto de *undertressing*.

Los resultados obtenidos con este método son — según sus autores — algo inferiores a los deducidos de los ensayos corrientes de fatiga, excepto para el duraluminio y para el latón. La diferencia mayor correspondió al duraluminio y fué de 11.8 %.

Föppl, en un estudio sobre la importancia práctica de la capacidad de amortiguación de los metales y especialmente de los aceros expresa que, mientras el esfuerzo varía entre dos límites iguales y opuestos que no excede de ciertos valores $-f_1$ y $+f_1$, la relación entre el esfuerzo y la deformación se halla representada por una recta (fig. 40); con

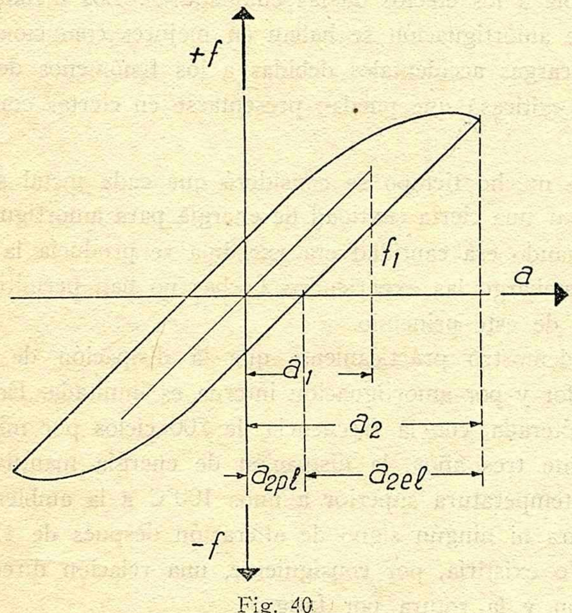


Fig. 40

un esfuerzo $f_2 > f_1$ se presentan deformaciones plásticas, observándose un bucle de histéresis. En efecto, el esfuerzo f_2 produce no solamente la deformación elástica a_{2el} el sino también la deformación plástica a_{2pl} que constituye la deformación residual después que ha desaparecido el esfuerzo.

Föppl halló que muchos aceros pueden tener una deformación plástica apreciable (por ejemplo $a_{pl} = 0.1\ a_{el}$) sin que se produzcan roturas después de millones de ciclos.

El área del bucle de histéresis corresponde a la energía desprendida como calor. La relación entre la deformación plástica y la elástica,

o sea entre el área del bucle y la energía total de deformación puede ser adoptada como medida de capacidad del metal para la amortiguación.

De acuerdo con las experiencias de Föppl, los metales se comportan de manera muy diferente según sea su capacidad de amortiguación. Así, por ejemplo, para el duraluminio las vibraciones se amortiguan muy lentamente, vale decir, que cada vibración amortigua una pequeña cantidad de energía; para el acero dulce, por el contrario, la amortiguación es muy rápida.

Según Cazaud y Persoz, un metal de gran capacidad de amortiguación es superior a otro de pequeña capacidad. El primero es mucho menos sensible a los efectos de las entalladuras. Los metales con gran capacidad de amortiguación se hallan en mejores condiciones para soportar sobrecargas accidentales debidas a los fenómenos de resonancia (velocidades críticas) que puedan presentarse en ciertas condiciones de servicio.

Durante mucho tiempo se consideró que cada metal sólo era capaz de disipar una cierta cantidad de energía para amortiguación interna y que cuando esa cantidad era excedida se producía la rotura por fatiga. Sin embargo las experiencias hechas no han permitido verificar la exactitud de este principio.

Föppl demostró prácticamente que la disipación de energía en forma de calor y por amortiguación interna es ilimitada. En un ensayo de torsión alterada, con la frecuencia de 700 ciclos por minuto, continuado durante tres años, la disipación de energía mantuvo el ejemplar a una temperatura superior a unos 100°C a la ambiente, sin que hubiera rotura ni ningún signo de alteración después de 1.100.000.000 de ciclos. No existiría, por consiguiente, una relación directa entre la amortiguación y la rotura por fatiga.

Fracturas por fatiga — Las fracturas por fatiga presentan ciertas características que las hacen difícilmente confundibles con las producidas por los esfuerzos estáticos y por los esfuezos dinámicos, correspondientes a los límites de fractura respectivos. En aquellas es posible distinguir dos zonas perfectamente diferenciadas como puede observarse en las figuras 41 y 42. Una de ella de aspecto mate producida durante una primera etapa de la fractura y la otra cristalina o fibrosa — según los materiales — que corresponde a la etapa final de la rotura. Se puede ver, además, algunas partes brillantes que se habrían producido, seguramente, por el frotamiento entre las dos caras de

la fractura, antes de producirse ésta en su totalidad. El examen atento de la fractura permite, generalmente, distinguir algunas estrías, cuyo origen es algún defecto existente en el interior o en la superficie de la pieza. Parecería evidente así, que la fractura fuera la consecuencia de la propagación de una fisura — inicialmente muy pequeña — que al ir reduciendo la sección transversal, hubiera llegado en cierto instante, a

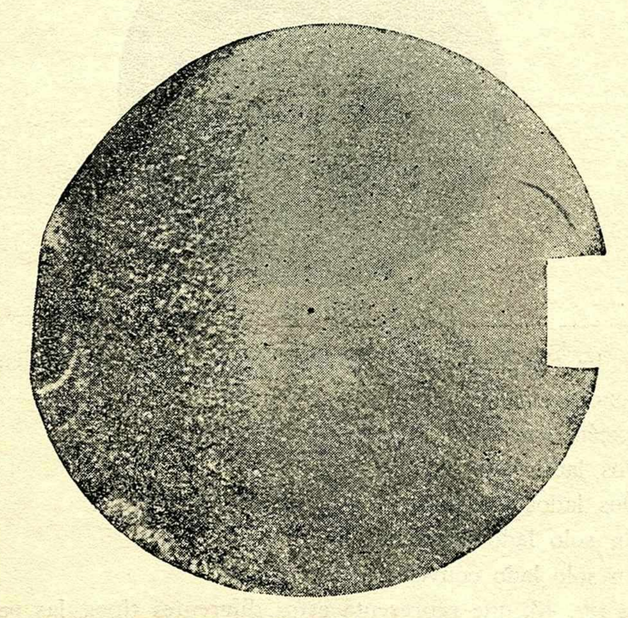


Fig. 41

hacerla insuficiente, para soportar el esfuerzo aplicado. En ese momento, la rotura, que se habría hecho inevitable, se produciría en forma repentina y sin deformación apreciable.

En aquellos casos en que los materiales se hallan sometidos a series intermitentes de esfuerzos — tal como ocurre con lo materiales *en servicio* — aparecen ciertas líneas que corresponden a los períodos de reposo; pueden apreciarse en la fig. 41. Este fenómeno no se presenta, en cambio, cuando se trata de ejemplares sometidos a los ensayos de fatiga, donde los esfuerzos actúan constantemente, con la misma intensidad y sin períodos de interrupción.

Dichas líneas serían — según Cazaud y Persoz — debidas a una propiedad del material, que le permite compensar con una deformación plástica, el aumento local de la tensión en el fondo de la entalladura

creada por la fisura. Esas líneas de detención aparecen más nítidas en os metales que poseen una gran capacidad para las deformaciones permanentes.

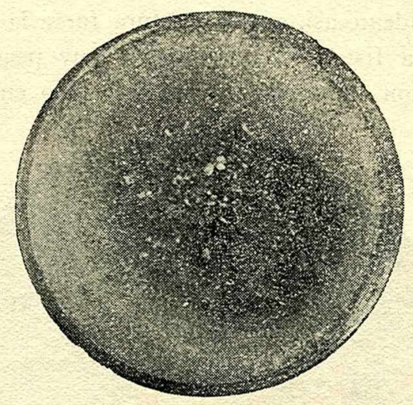


Fig. 42

Bacon ha clasificado las fracturas de fatiga en la siguiente forma:

a) Concéntrica.

b) Excéntrica.

c) Dos lados convexos.

d) Dos lados cóncavos.

e) Un solo lado cóncavo.

f) Un solo lado convexo.

En la fig. 43, que representa estos diferentes tipos, las partes blancas corresponden a la zona de fatiga y las negras a la zona de rotura final.

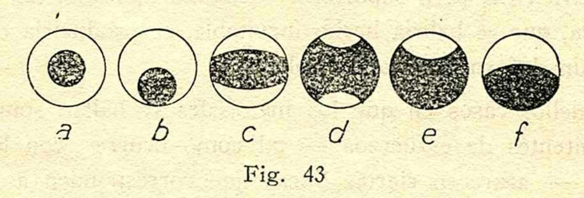


Fig. 43

El diagrama presentado en la fig. 44 corresponde, de acuerdo con lo expresado por Field Foster, a una representación hipotética de la marcha de la fisuración en un ensayo por flexión rotativa; consiste en un sistema de arcos elípticos que tiene su origen en un pequeño semicírculo ubicado al principio de la fisura *A* y que eventualmente tiende a rectificarse hacia un diámetro inclinado 30°, en dirección contraria a la rotación.

De los trabajos últimamente realizados se deduce que las tensiones elevadas producen fracturas concéntricas, mientras que las tensiones débiles causan fracturas excéntricas.

En las barras ensayadas por flexión rotativa, la fisura de fatiga empieza generalmente en la periferia — donde la tensión es máxima — y se extiende hacia el centro. Cuando la concentración de tensiones es debida a filetes o agujeros la grieta se inicia por lo común en el lugar de la mayor tensión y se propaga desde ese punto.

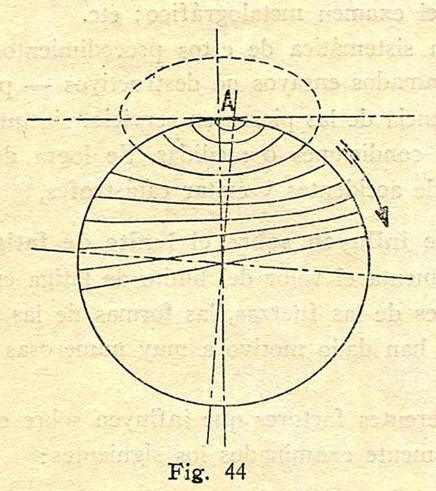


Fig. 44

Según Cazaud y Persoz, en el caso de una sección entallada circularmente, la zona de fractura por fatiga comienza sobre la circunferencia para dejar una zona de fractura final situada en el centro de la sección cuando la rotura se produce con una fuerte sobrecarga, y excéntrica si se trata de una débil sobrecarga.

El examen de las piezas y la aplicación de métodos fotoelasticimétricos han permitido comprobar que las fisuras producidas por fatiga siguen una dirección normal a las líneas de igual tensión.

La velocidad de fisuración aumenta, según Oschatz, como el cuadrado de la profundidad de la fisura, en el caso de flexión rotativa sobre ejes lisos.

Las fisuras son, en su comienzo, extraordinariamente finas y su revelación constituyen una operación muy delicada. A partir del instante en que esas fisuras se hacen visibles a simple vista, la marcha de la fisuración se acelera a consecuencia del aumento de las tensiones lo-

cales en las inmediaciones de la fisura y entonces la fractura debe considerarse como inminente.

Se siguen diferentes métodos para examinar las piezas, con el objeto de descubrir a tiempo la existencia de pequeñas fisuras y permitir así el retiro oportuno de las piezas en peligro. Entre esos métodos pueden citarse como los más usados, los basados en el empleo de aceite caliente y cal o de petróleo y arena fina: los métodos mágneticos; los métodos magnéticos acústicos; los métodos electromagnéticos; el ataque químico; el examen metalográfico; etc.

La aplicación sistemática de estos procedimientos — que integran el grupo de los llamados ensayos no destructivos — permite ejercer eficazmente la vigilancia de las piezas en servicio, sin que sea necesario alterar sus formas, condiciones o medidas. Se logra de esta manera reducir el número de accidentes y evitar catástrofes.

Factores que influyen sobre el límite de fatiga — Las variaciones que experimenta el valor del límite de fatiga cuando se hace variar las condiciones de las fuerzas, las formas de las piezas o el estado de los materiales, han dado motivo a muy numerosas e interesantes investigaciones.

Entre las diferentes factores que influyen sobre el límite de fatiga, han sido principalmente examinados los siguientes:

Influencia de las fuerzas	Frecuencia de las solicitaciones Variaciones en el valor de los esfuerzos. Períodos de reposo
Influencia de las piezas	Perfil longitudinal. Estado de las superficies.
Influencia de los materiales	Tratamientos térmicos. Tensiones internas. Temperatura. Corrosión.

Frecuencia de las solicitaciones — Según Cazaud y Persoz, la frecuencia de los esfuerzos influye notablemente sobre los resultados de los ensayos de fatiga, cuando el esfuerzo aplicado es lo suficientemente elevado para producir — como consecuencia del fenómeno de his-

téresis mecánica — un desprendimiento de calor que no puede ser evacuado por radiación en el aire ambiente.

Experiencias de flexión rotativa efectuadas por estos investigadores a las velocidades de 3000, 8000, 11000, y 15000 vueltas por minuto, con un acero niquel-cromo recocido, han demostrado que, para los valores más elevados de los esfuerzos, el número de solicitaciones que produce la rotura disminuye cuando la velocidad pasa a 3000 a 8000 vueltas por minuto. El hecho se debería al calentamiento por histéresis y reactividad, que aumenta hasta el punto de llevar el metal al rojo. Por lo contrario, con esfuerzos más próximos al límite de fatiga, pero en los que no se manifiesta ningún calentamiento apreciable, la influencia de la velocidad, nula hasta 8000 vueltas por minuto, se traduce por un aumento del límite de fatiga a 11000 y 15000 vueltas por minuto. Hechos semejantes han sido verificados, entre otros, por Stanton, Edem, Roos y Cunnigham, Rose y Hjelmsäter, Moore y Jasper, Jenkin y Lehman,, Korber y Hempel, etc.

Variaciones en el valor de los esfuerzos — Moore y Jasper han comprobado que si se aplican momentáneamente esfuerzos alternados, superiores al límite de fatiga, se encuentra ulteriormente un nuevo límite inferior al primitivo. Esto se cumple tanto si se trata de esfuerzos excesivos aplicados durante muy poco tiempo, como de esfuerzos ligeramente superiores al límite de fatiga pero aplicados durante un espacio de tiempo algo mayor que en el caso precedente. Es el efecto denominado *overstressing.* Por lo contrario, si el ejemplar ha soportado anteriormente un gran número de esfuerzos alternados, ligeramente inferiores al límite de fatiga, se encuentra un nuevo límite más elevado. Es el efecto lamado *understressing.* La explicación generalmente admitida de este fenómeno es que el límite de elasticidad aumenta a consecuencia de la repetición de los esfuerzos y que, por consiguiente, el límite de fatiga resulta también aumentado. El efecto de *understressing* se manifiesta en mayor grado con los materiales dúctiles que con los materiales frágiles. En aquellos el límite de fatiga puede ser aumentado hasta en un 30 %. La propiedad que tienen algunos materiales de soportar esfuerzos muy elevados, sin formación de grietas, ha sido llamado por Moore: *facultad de deformación sin fisuras.*

Períodos de reposo — Las suspensiones momentáneas de los esfuerzos no ejercen — según las experiencias realizadas — ningún efecto favorable sobre la resistencia a la fatiga cuando los esfuerzos son

inferiores al límite aparente de elasticidad. En el caso contrario se observa un ligero aumento del límite de fatiga.

Perfil longitudinal — La experiencia demuestra que todo cambio brusco de sección, — entalladuras, agujeros, roscas, etc. — al producir una concentración de tensiones, ejerce una influencia muy importante sobre el límite de fatiga.

La fig. 45 demuestra las variaciones del límite de fatiga — de acuerdo con ensayos hechos por Moore — producidas por el paso de una sección de 10 mm. de diámetro a otra de 7 mm. de diámetro, realizado de distintas maneras.

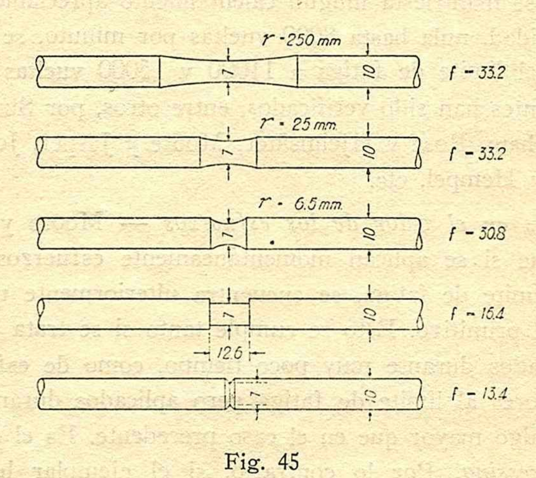


Fig. 45

"Cuando sobre un ejemplar de extensión de un metal dúctil — dicen Cazaud y Persoz — se hace una entalladura circular, se comprueba, en el ensayo a la extensión, que la resistencia referida a la sección rebajada es tanto mayor cuanto más profunda es la entalladura. Con una entalladura que ocupara toda la sección se halla (por extrapolación) una resistencia llamada resistencia de cohesión, que es notablemente superior a la resistencia a la extensión. Estos hechos conocidos se explican por las pequeñas deformaciones permanentes que, produciéndose en el fondo de la entalladura, igualan las tensiones, de donde resulta una atenuación de la tensión en ese lugar. Con los metales no dúctiles dicha compensación no se produce y la resistencia aparece disminuída. Se puede concebir así, desde el punto de vista de la fatiga, que los ejemplares entallados se comportarán en forma bastante diferente según sean o no dúctiles.

La experiencia ha demostrado, sin embargo, que en todos los casos las entalladuras disminuyen el límite de fatiga".

En el caso de roscas, los filetes triangulares de fondo agudo disminuyen más el límite de fatiga que los filetes triangulares de fondo redondo y que los filetes semi-redondos.

Estado de las superficies — Es un hecho muy conocido que las piezas trabajadas exteriormente sin mucha prolijidad, resisten mucho menos a los esfuerzos de fatiga que aquellas que son cuidadosamente pulidas.

El endurecimiento superficial producido por diferentes procedimientos aumenta también el límite de fatiga. Gran número de ensayos efectuados en diferentes laboratorios confirman plenamente estas conclusiones.

Algunos ensayos efectuados últimamente por Lessells y Murray, en el Instituto Tecnológico de Massuchussetts, en los que — previamente al ensayo de fatiga — se sometía a los ejemplares a un bombardeo con municiones de acero, les permitieron comprobar — luego de efectuar un gran número de experiencias — que puede obtenerse, bajo ciertas condiciones, un aumento considerable en la vida y en el límite de fatiga de los aceros o de otros metales, con la aplicación del citado tratamiento.

Los referidos aumentos paracen ser motivados por el *ecrouissage* producido en la superficie de las piezas, aunque no se descarta la posibilidad de que también el esfuerzo de compresión pueda influir beneficiosamente.

Tratamientos térmicos — Por efectos de estos tratamientos se crean, generalmente, esfuerzos internos, que pueden influir de manera sensible sobre el límite de fatiga. Así, en el caso de roscas con filetes triangulares de fondo agudo, filetes triangulares de fondo redondo o filetes semiredondos, se observan grandes modificaciones en el valor del límite de fatiga, según que el material haya sido templado después o antes de hechos los filetes. En el primer caso la reducción del límite de fatiga puede alcanzar hasta un 89 % si se trata de filetes trianguleres de fondo agudo; hasta un 76 % si son filetes triangulares de fondo redondo; y hasta un 65 % si son filetets semerredondos.

Cuando no fuera posible — a causa del gran endurecimiento producido en el metal — hacer las roscas posteriormente al temple, se recomienda que las piezas roscadas sean sometidas a un recocido que,

al atenuar las tensiones internas, mejorará apreciablemente su resistencia a la fatiga. En el ejempo citado as disminuciones del 89 %, 76 % y 63 % quedaron reducidas a un 50 %, 43 % y 38 %, respectivamente.

Tensiones internas. — Como ya lo hemos expresado, la existencia de esfuerzos internos en determinados puntos de las piezas, puede influir notablemente sobre el valor del límite de fatiga. Muchas fracturas, producidas en servicio, no reconocen efectivamente otra causa que la suma de dichos esfuerzos internos y los producidos por las fuerzas exteriores aplicadas.

Existe la posibilidad de contrarrestar la influencia de algunos esfuerzos internos creando otros esfuerzos. Así por ejemplo, puede reducirse la influencia de un esfuerzo existente en el fondo de una entalladura si se somete la pieza a una fuerza de extensión. A consecuencia de ésta, las partes más próximas al fondo de la entalladura, donde el límite de elasticidad hubiera sido excedido, sufrirán una deformación más grande que las situadas en el interior, si estas se hallan aún dentro del período elástico. Al desaparecer el esfuerzo de extensión subsistirán en la pieza tensiones residuales y el anillo de metal constituído por el fondo de la entalladura se hallará comprimido por la reacción elástica del centro menos deformado. Se habrán creado de esta manera esfuerzos internos favorables.

En otros casos puede obtenerse una distribución más favorable de los esfuerzos internos practicando en las inmediaciones de la zona peligrosa, creada por una entalladura, otras entalladuras de menos profundidad — denominadas entalladuras de descarga — que permiten crear otros puntos de concentración de esfuerzos internos, tendiendo de este modo a igualar esfuerzos, disminuyendo su intensidad y repartiéndolos en un mayor volumen de la pieza.

Temperatura. — Se ha determinado experimentalmente que, para la mayoría de los aceros, el límite de fatiga resulta más elevado a temperaturas comprendidas entre 300° y 350° que a la temperatura ordinaria. Cuando la temperatura excede de 350° el límite de fatiga disminuye. En otros aceros se observa, por lo contrario, que este límite disminuye de una manera contínua con el aumento de la temperatura. Hay que tener presente, por otra parte, que después de los 200° pueden producirse oxidaciones, que ejercen una influencia desfavorable sobre la resistencia a la fatiga. Para temperaturas inferiores a 0°,

algunos aceros experimentan un aumento en el valor del límite de fatiga.

Corrosión. — Cuando una pieza metálica está expuesta a la corrosión — como ocurre casi siempre — se observa en general, una disminución, que puede ser muy grande, en la resistencia a la fatiga. Las picaduras producidas en la superficie equivalen prácticamente a pequeñas entalladuras, con la creación consiguiente de esfuerzos internos.

La corrosión producida con anterioridad a la puesta en servicio de la pieza o a la ejecución del ensayo, ejerce una influencia menor que la corrosión producida durante el servicio o durante el ensayo. En este último caso la propagación de las fisuras resulta acelerada a consecuencia del subsiguiente ataque por corrosión.

El comportamiento de un mismo metal puede ser diferente cuando varía la causa de la corrosión. En agua dulce, por ejemplo, la corrosión de un acero se produce diferentemente que en agua de mar.

Puede ocurrir a veces que, a consecuencia de la formación de una película protectora, el metal quede preservado del ataque ulterior del reactivo y en tales circunstancias puede no haber variación en el límite ordinario de fatiga. En cambio, si no se forma dicha película, el ataque puede continuar hasta la destrucción o disolución del metal. En este caso no existiría en realidad un límite de fatiga bajo corrosión.

Es necesario, por consiguiente, realizar ensayos toda vez que se quiera conocer el comportamiento de un metal expuesto a la acción de un medio corosivo. Igualmente, cuando se trata de estudiar la eficacia de los diferentes medios de protección posibles, tales como la aplicación de ciertos revestimientos o el agregado al medio corrosivo de ciertas sustancias que anulen o retarden su acción.

algunos aceros experimentan un aumento en el valor del límite de fatiga.

Corrosión. — Cuando una pieza metálica está expuesta a la corrosión — como ocurre casi siempre — se observa en general una disminución, que puede ser muy grande, en la resistencia a la fatiga. Las picaduras producidas en la superficie equivalen prácticamente a pequeñas entalladuras, con la creación consiguiente de esfuerzos internos.

La corrosión producida con anterioridad a la puesta en servicio de la pieza o a la ejecución del ensayo, ejerce una influencia menor que la corrosión producida durante el servicio o durante el ensayo. En este último caso la propagación de la fisura resulta acelerada a consecuencia del simultáneo ataque por corrosión.

El comportamiento de un mismo metal puede ser diferente cuando varía la causa de la corrosión. En agua dulce, por ejemplo, la corrosión de un acero se produce diferentemente que en agua de mar.

Puede ocurrir a veces que, a consecuencia de la formación de una película protectora, el metal quede preservado del ataque ulterior del medio, y en tales circunstancias puede no haber variación en el límite aparente de fatiga. En cambio, si no se forma dicha película, el ataque puede continuar hasta la destrucción o disolución del metal. En este caso no existirá en realidad un límite de fatiga bajo corrosión.

Es necesario, por consiguiente, realizar ensayos toda vez que se quiera conocer el comportamiento de un metal expuesto a la acción de un medio corrosivo. Igualmente, cuando se trata de estudiar la eficacia de los diferentes medios de protección posibles, tales como la aplicación de placas o revestimientos o el agregado al medio corrosivo de ciertas sustancias que inhiban o retarden su acción.

CAPITULO X

ENSAYOS DE FRAGILIDAD

Definición. — Se ha llamado fragilidad a la propiedad que poseen algunos materiales de romperse con muy o ninguna deformación permanente y exigiendo por consiguiente un gasto mínimo de trabajo, pero sin especificar nada con respecto a la naturaleza de las fuerzas aplicadas, es decir, sin establecer distinción alguna entre esfuerzos estáticos y esfuerzos dinámicos.

Sin embargo, la tendencia más generalizada en la actualidad es la de reservar exclusivamente la denominación de fragilidad para los casos de choques o sea de esfuerzos aplicados bruscamente. Esta es la acepción que hemos adoptado también nosotros.

Es bien sabido que existen materiales que en cualquier caso tendrán que ser calificados de frágiles. El cristal, la fundición, las piedras, etc., se comportan en igual forma tanto bajo la acción de fuerzas estáticas como de fuerzas dinámicas. Por lo contrario, hay materiales tales como algunos aceros que pueden aparecer como no frágiles cuando se les somete a esfuerzos que aumentan en forma gradual y como frágiles cuando reciben choques o esfuerzos aplicados de manera brusca. Y puede ocurrir todavía que un mismo acero se revele o no como frágil según sean las condiciones en que actúen sobre él las fuerzas dinámicas. Influyen, en efecto, sobre los resultados, la temperatura, la velocidad, la forma y dimensiones de las piezas, etc. Se puede presentar así lo que H. Le Chatelier llamó *fragilidad intermitente*, que ha motivado numerosas e importantes investigaciones, plenamente justificadas por la gravedad que significa el empleo de ese metal en determinadas circunstancias.

Los accidentes producidos por la utilización de aceros frágiles pueden ser muy serios y costar muchas vidas. La explosión de una caldera, un descarrilamiento, la rotura de un eje, de una llanta, etc., son a menudo consecuencias de la fragilidad. En otros casos se puede ocasionar pérdidas cuantiosas de dinero.

Los ensayos por acción gradual, que se consideraron durante mu-

cho tiempo como los más indicados para juzgar la calidad de los aceros, revelaron en algunos casos ser absolutamente insuficientes. Algunos metales que se habían ensayado satisfactoriamente a la extensión se rompieron como vidrio al caer sobre el pavimento desde alturas insignificantes. Y después de producida esta rotura, al ensayarse nuevamente los trozos restantes a la extensión, volvieron a obtenerse los mismos resultados que antes.

Los ensayos de fragilidad pueden clasificarse en dos grupos:

1.° — Ensayos de flexión por choque sobre barras entalladas.
2.° — Ensayos de extensión por choque sobre barras entalladas.

ENSAYOS DE FLEXION POR CHOQUE SOBRE BARRAS ENTALLADAS

Definiciones. En la reunión celebrada en Budapest, en Setiembre de 1936, por el Comité I.S.A.—17, se votaron varias resoluciones de la más grande importancia, pues constituyen la solución final y definitiva de un largo proceso en el que se investigaron y discutieron todos los problemas que planteaba este ensayo, en una forma tan minuciosa como quizá no se había realizado antes con ningún otro ensayo. Dichas conclusiones pueden resumirse en los siguientes términos:

El ensayo de fragilidad consiste en romper con un solo golpe y en las condiciones que se indican a continuación, un ejemplar entallado en su centro.

La relación entre el trabajo absorbido, expresado en kilográmetros, y la sección de rotura — medida en la entalladura — expresada en centímetros cuadrados, se denomina resiliencia; se indicará con la letra K y se expresará por consiguiente en kgm/cm^2.

El ejemplar (fig. 46) de sección cuadrada de 10 mm. de lado y de 55 mm. de longitud tendrá en su centro una entalladura de 5 mm., con fondo cilíndrico de 1 mm. de radio. Esta entalladura podrá hacerse con un taladro y una sierra o con una fresa. En el fondo de la entalladura no deberá haber ranuras laterales producidas por la herramientta.

La máquina a emplear será un martinente péndulo; las condiciones a que debe ajustarse han sido indicadas en el capítulo II, en la parte relativa a las máquinas para ensayo de choque. El ejemplar debe reposar bien sobre los apoyos, separados entre sí 40 mm., y su posición ser tal que el choque se produzca exactamente en el plano de la entalladura. Salvo indicación especial la temperatura del ensayo será de 20°C.

En los Estados Unidos de Norte América la American Society for

Testing Materials adoptó en 1933 unas normas que fueron revisadas en 1934 y 1941. De acuerdo con esas normas los ensayos pueden realizarse por los procedimientos siguientes:

I) *Ensayo Charpy* — Ejemplares colocados sobre dos apoyos separados entre sí 40 mm. y golpeados en el centro, donde se halla la entalladura. Los ejemplares medirán 10 x 10 x 50 mm. Puede usarse dos tipos de entalladura: a) entalladura en ángulo de 45° de 2 mm. de profundidad y con un fondo cilíndrico de 0.25 mm. de radio; b) entalladura tipo I. S. A.

II) *Ensayo Izod* — Ejemplares empotrados; la entalladura debe coincidir con el plano de empotramiento. Las dimensiones de la sección

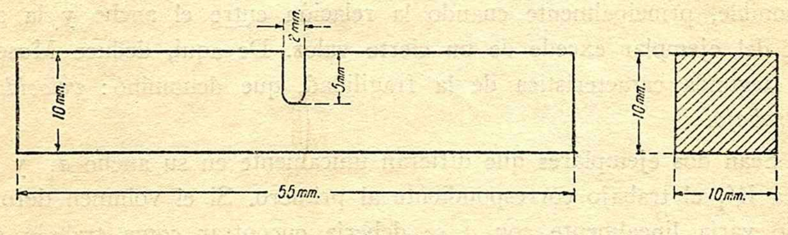


Fig. 46

del ejemplar son idénticas a las indicadas en el ensayo Charpy. La longitud del ejemplar depende del tipo de máquina usada. La entalladura es la del tipo *a* del ensayo anterior. El choque se produce a una distancia de 22 mm. del plano de empotramiento.

Ensayos de Moser — Durante una discusión promovida en el greso de Copenhague (1909) Schüle observó que el trabajo de choque no debería ser referido a la unidad de superficie de la sección de rotura, sino más exactamente a la unidad de volumen que haya trabajado más allá del límite de elasticidad. La determinación de dicho volumen podría hacerse sin dificultad puliendo las caras del ejemplar. La parte influída por el choque se reconoce por el velo que aparece en la superficie pulida.

Coincidiendo con esta idea, varios autores Unwin, Fillunger, Petrenko, Moser, etc., intentaron establecer fórmulas empíricas que relacionen dicho trabajo con ciertos volúmenes.

Moser, al tratar de relacionar el trabajo de rotura W con el volumen deformado V, adoptó la relación:

$$Kv = \frac{W}{V} \text{ . kgm/cm}^3$$

Para evaluar el volumen V utilizó el reactivo Fry.

Moser llegó a la conclusión de que K_v es constante para cualquier ancho del ejemplar, siendo unicamente función de la naturaleza del metal. Teniendo en vista esta circunstancia denominó a K_v : *constante de trabajo de la unidad de volumen del metal.*

Pero, por otra parte, el volumen deformado varía con el ancho del ejemplar. En el caso de metales que se deforman con rapidez, V aumenta linealmente con dicho ancho, pero en el caso de metales que se deforman lentamente, si el esfuerzo aumenta muy rápidamente, el máximo de volumen deformable no puede ser alcanzado en el tiempo disponible, principalmente cuando la relación entre el ancho y la altura del ejemplar excede de un cierto valor. De aquí, deduce Moser, una segunda característica de la fragilidad, que denominó: *velocidad de trabajo.*

Sean dos ejemplares que difieran únicamente en su ancho a_1 y a_2 y sea W_1 el trabajo correspondiente al primero. Si el volumen deformado varía linealmente con a se debería encontrar como trabajo de rotura en el segundo ejemplar:

$$W'_2 = W_1 \times \frac{a_2}{a_1}$$

Pero en realidad se encuentra un trabajo W_2 que puede ser diferente de W'_2. La relación:

$$A \% = \frac{W_2}{W'_2} \times 100$$

define la velocidad de trabajo.

Reemplazando W'_1 por su valor:

$$A \% = \frac{W_2}{W_1} \times \frac{a_1}{a_2} \times 100$$

Por consiguiente la fragilidad estaría caracterizada por dos factores: la *constante del trabajo* y la *velocidad del trabajo.* Es necesario — por lo tanto — para su determinación, el empleo de dos ejemplares de diferente ancho. Según Moser las secciones útiles de 1.5 × 1.5 cm. y 1.5 × 3 cm. serían convenientes.

Fundado en estas consideraciones Moser dedujo algunas conclusiones de interés. Por ejemplo, cuando hay que fabricar piezas que deben estar sometidas a choques rápidos y bruscos, se debe elegir un metal que posea principalmente una gran *velocidad del trabajo*. Por lo contrario, cuando los esfuerzos se desarrollan lentamente lo que debe considerarse en primer término es la *constante del trabajo*.

Los dos coeficientes son influídos por la temperatura, pero la *velocidad del trabajo* en mayor proporción. Así, por ejemplo, para un acero de 0.35 % de *C*, la velocidad de trabajo que a la temperatura ordinaria es de 75 %, en el estado recocido, y de 30 % en estado sobrecalentado, aumenta a 100 % en los dos casos cuando la temperatura es de 100°C. Esto resulta ventajoso para las piezas que deben trabajar en caliente (palastros de calderas, etc.). Por otra parte, observa Moser, los dos coeficientes nunca son simultáneamente malos. Ensayos ejecutados sobre barras extraídas de una pieza forjada en caliente han acusado una *velocidad del trabajo* débil y una *constante del trabajo* aceptable. Sometiendo el metal a un recocido perfecto, luego de forjado, las dos magnitudes han resultado buenas. Un estirado de 10 %, efectuado después del recocido, disminuye *la constante del trabajo* sin variar casi la *velocidad del trabajo*. La influencia de los tratamientos térmicos o mecánicos puede, por lo tanto, ser evidenciada por el ensayo de los dos ejemplares y permite en cada caso determinar el procedimiento más adecuado para atenuar, en lo posible, los defectos provenientes de la fragilidad.

Trabajos efectuados posteriormente por otros investigadores han demostrado que la *constante del trabajo* no es un valor fijo. La circunstancia de haber operado Moser sobre metales cuyo trabajo de deformación era grande explica la razón de sus conclusiones.

Sin embargo se ha continuado, en muchos casos, relacionando el trabajo de rotura al volumen deformado, por considerar que es más lógico que referirlo a la sección entallada. El coeficiente obtenido de esta manera ha sido denominado: *trabajo volumétrico medio de choque*. La dificultad mayor consiste en que no es fácil evaluar exactamente dicho volumen deformado.

Ensayos de Sauerwald y Wieland — Estos investigadores llegaron también a la conclusión de que no está comprobada la existencia de una característica de volumen deformado. La definición de *velocidad del trabajo* debería asimismo ser modificada. Sea como antes W. .la energía absorbida por la rotura, a el ancho del ejemplar, y f la superficie del

valumen deformado, medida sobre la cara lateral del ejemplar. El volumen deformado será, por consiguiente:

$$V = a \cdot f$$

y en consecuencia el *trabajo volumétrico medio* de uno de los ejemplares sería $\frac{W_1}{a_1 f_1}$ y el del otro $\frac{W_2}{a_2 f_2}$; la *velocidad del trabajo* sería

$$A\ \% = 100\ \frac{W_2}{a_2 f_2} : \frac{W_1}{a_1 f_1}$$

$$\text{o } A\ \% = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{f_1}{f_2} \cdot \frac{a_1}{a_2} \times 100$$

mientras que Moser admite $f_1 = f_2$ y por consiguiente:

$$A\ \% = \frac{W_2}{W_1} \cdot \frac{a_1}{a_2} \times 100$$

Método propuesto por Davidenkow — Son muy numerosos los estudios e investigaciones relativos al ensayo de flexión por choque sobre barras entalladas realizadas con el fin de determinar la influencia ejercida en los resultados por los distintos factores que intervienen en el ensayo.

Dejean y Gerszonowicz, en un interesante análisis de los trabajos realizados hasta 1934, clasificaron dichos factores, a los efectos de facilitar su consideración, en la siguiente forma:

Influencia del ejemplar	Dimensiones. Profundidad y forma de la entalladura
Influencia de la máquina	Tipo de máquina. Velocidad.
Influencia de las condiciones del ensayo	Temperatura
Influencia del material	„Ecrouissage". Dimensión de los granos. Procedimientos de elaboración. Tratamientos térmicos. Heterogeneidad.

Se admite, en general, que cada uno de dichos factores pasa por un

período durante el cual la dispersión de los resultados se produce en una forma absolutamente irregualar.

Mientras los resultados corresponden (fig. 47) a la rama superior de la curva *a b*, el metal presenta una fratura fibrosa y la resiliencia tiene valores elevados. En la zona comprendida dentro del perímetro *b, c. d, e* se observa una gran dispersión; los resultados son contradictorios e irregulares. En la parte *e, f* la resiliencia presenta valores mínimos y la fractura es granular.

Davidenkow, ocupándose de estas cuestiones, expresa que para la clasificación de los metales sería más importante conocer, no el valor de la resiliencia sino las condiciones del pasaje (por ej.: temperatura,

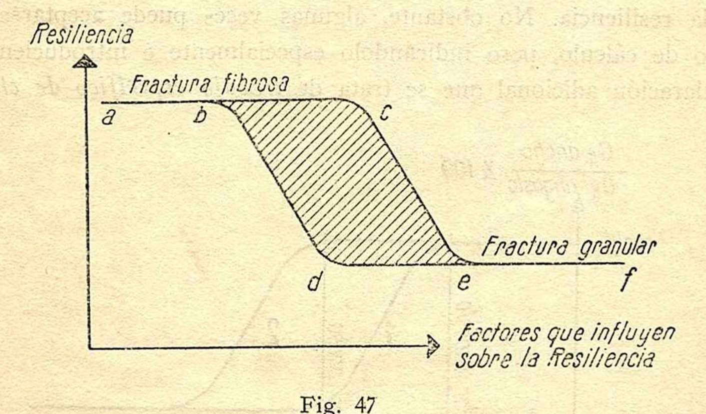


Fig. 47

velocidad o dimensiones críticas) de la curva superior a la inferior, es decir, de la fractura por deslizamiento (fibrosa con deformación) a la rotura intercristalina (granular sin deformación).

Refiriéndose especialmente a los trabajos de investigación, Davidenkow dice: "En todos los casos en que no sean conocidas las propiedades de un determinado metal (o cuando se hallen en estudio) conviene hacer, en serie, los ensayos de choque a diferentes temperaturas, variables entre -196° (aire líquido) y la temperatura de máxima resistencia (100° a 200°) que sea necesario alcanzar, sobre barras entalladas y con los resultados obtenidos trazar las curvas resiliencia-temperatura.

La principal propiedad que debe determinarse es la *temperatura crítica,* que corresponde al pasaje del estado plástico al estado frágil. Solamente en casos excepcionales, por carencia de tiempo o de material, puede limitarse — de acuerdo con el procedimiento de Moser — el ensayo a dos ejemplares, uno ancho y otro angosto. El ensayo en este

caso consistiría en determinar la relación entre los trabajos unitarios correspondientes a ambos ejemplares, cuya relación caracterizaría la tendencia del metal a pasar al estado frágil cuando se aumenta el ancho del ejemplar (fig. 48), es decir, la tendencia a la fractura frágil en general.

Como mínimo debe ensayarse de 40 a 50 ejemplares; necesariamente tres o cuatro para cada temperatura.

En vista de que el trabajo de deformación no se distribuye de una manera uniforme en toda la sección transversal del ejemplar, sólo puede admitirse convencionalmente que la relación entre el trabajo total de rotura y el área de la sección, para un tipo dado de ejemplar, sea llamada resiliencia. No obstante, algunas veces puede aceptarse dicho método de cálculo, pero indicándolo especialmente e introduciendo como aclaración adicional que se trata de *trabajo específico de choque*".

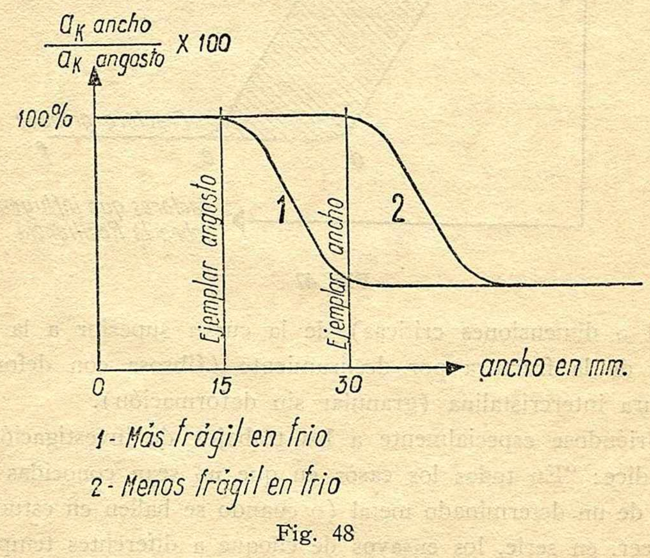


Fig. 48

Davidenkow, refiriéndose a los ensayos normalizados de futuro hace notar que los procedimientos en uso presentan el inconveniente de no suministrar al proyectista datos numéricos, utilizables en el cálculo, tales como la resistencia a la extensión, el límite aparente de elasticidad, etc. Sólo pueden servir como un medio para comprobar defectos. Es, en definitiva, un ensayo tecnológico que permite determinar si un material es o no frágil, es decir, si debe ser rechazado o si puede ser aceptado. Por estas razones sostiene Davidenkow que la normalización de-

be consistir en un cambio radical de todos los principios del ensayo de choque y de los cálculos respectivos.

Los métodos usuales de cálculo para las cargas dinámicas y estáticas se reducen a la aplicación de coeficientes normales de resistencia o de seguridad incluídos en las especificaciones. Ahora bien; para los metales que en ciertas condiciones presentan una tendencia a la fractura frágil, tales como el acero, es necesario fijar un límite de seguridad que evite el pasaje al estado frágil. Esto puede hacerse introduciendo en los cálculos un nuevo coeficiente: *coeficiente de fragilidad*, cuyo valor numérico podría ser establecido también como coeficiente de seguridad. Su determinación debe relacionarse con los resultados numéricos del ensayo de choque que, de este modo, quedaría colocado en el mismo nivel que los otros ensayos mecánicos.

Dicho coeficiente podría ser determinado en diferentes formas. Davidenkow sugiere la que se indicará a continuación.

Se sabe, ante todo, que cuando desciende la temperatura del ensayo se alcanza en algunos casos la *temperatura crítica,* que lleva el ejemplar al estado frágil. Para un material determinado esta temperatura depende de diferentes parámetros variables: forma de la pieza (concentración del esfuerzo, estado elástico tridimensional, etc.), tamaño, naturaleza, velocidad de choque, etc.

Se puede admitir que para cada pieza la tendencia a la fragilidad depende del valor del intervalo $\triangle T$, que separa la temperatura de servicio de la temperatura crítica de fragilidad.

Davidenkow define aquel coeficiente K como sigue:

$$K = \frac{\triangle T}{T}$$

T es la temperatura de servicio de la pieza (absoluta), K es igual a cero, cuando la temperatura crítica coincide con la temperatura de servicio y es igual a *1* cuando la temperatura de fragilidad desciende al cero absoluto; durante el mencionado intervalo de temperatura se obtendrán valores intermedios.

Es obvio que la probabilidad de fractura frágil se presentará no sólo cuando la temperatura de servicio desciende hasta la temperatura crítica — lo que es difícil — sino también cuando la temperatura crítica aumenta hasta alcanzar el valor de la temperatura de servicio, como consecuencia de un cambio accidental de los otros parámetros, por

ejemplo: cambio brusco de secciones, fabricación defectuosa, aparición de fallas en la superficie, aumento de la velocidad de choque, etc.

El grado de seguridad contra estos riesgos podría ser puesto en función de algunos otros parámetros (velocidad de choque, característica de las cargas, etc.). Pero, en todo caso, el parámetro de comparación deberá ser elegido de una vez para siempre. El que resulta más práctico es la temperatura.

La dificultad consiste en hallar una definición más exacta del sentido de la temperatura crítica de fragilidad. En general, el pasaje del estado plástico al estado frágil no se produce claramente a una temperatura determinada, sino que corresponde a un cierto intervalo de temperatura. Luego sería preciso establecer una temperatura convencional que corresponda a la disminución del trabajo de deformación en un cierto porcentaje, por ejemplo 40 %, del trabajo máximo (generalmente debajo de este punto empieza la caída brusca de la curva, y en el diagrama esfuerzo-deformación se deja de alcanzar el máximo).

Con respecto a las piezas de máquinas y sus condiciones de servicio, las especificaciones normalizadas establecerían coeficientes de resistencia o de seguridad que permitieran al proyectista elegir el material y establecer las formas respectivas.

Para que esta sugestión pudiera ser llevada a la práctica sería necesario conocer los resultados del ensayo de choque a la temperatura crítica y los valores de algunos de los otros parámetros que influyen sobre ella. En el estado actual de nuestros conocimientos no es posible hacerlo. Es imposible calcular, ni siquiera, el pasaje simple de una forma de entalle a otra. Será necesario por consiguiente un trabajo preliminar de investigación muy grande y perseverante que debiera realizarse en los diferentes laboratorios de todo el mundo para, con los resultados del esfuerzo común, determinar los factores que influyen sobre la temperatura crítica y el modo de apreciarlos.

Es entendido que para la obtención de tales datos sería necesario prescribir una nueva forma de ensayos en serie, lo que constituye otra dificultad para los investigadores y sobre lo que no puede afirmarse aun nada en concreto.

ENSAYOS DE EXTENSION POR CHOQUE SOBRE BARRAS ENTALLADAS

Procedimiento de ensayo — Al ocuparnos en el capítulo VIII, relativo a los ensayos por choque, expresamos que los ensayos sobre

ejemplares metálicos de la forma allí indicada (fig. 33) en los que $l = 0$ y $d < 0.8D$, tienen una importancia muy grande y que constituyen un método muy apropiado para poner en evidencia la fragilidad del metal.

El procedimiento de ensayo sería el que se indica a continuación. Se determina, por medio de la fórmula indicada en dicho capítulo el trabajo específico de choque a la extensión correspondiente a los dos tipos de ejemplares cuyas dimensiones se indican en el cuadro que sigue:

Tipo	D	d	l	r
I	10	7	0	1
II	10	5	0	1

Llamemos T_u al trabajo específico correspondiente a la serie I y T'_u al correspondiente a la serie II. Se observa que si T'_u resulta menor que T_u el metal es frágil. La relación $\frac{T}{T'_u}$ podría ser por consiguiente adoptada como *índice de fragilidad.* En efecto, cuando $T'_u < T_u$ la fractura es intercristalina (fractura sin deformación, fractura granular), típica de los metales frágiles.

Conviene tener presente que si para valores de $d \leq 0.5D$ se obtienen fracturas granulares en el caso de ser $0.6D > d, > 0.5D$ la fractura podrá ser en parte granular y en parte fibrosa. El trabajo específicc en este caso sería un valor intermedio entre T_u y T'_u En cambio, cuando $0.6D < d < 0.8D$, la fractura sería totalmente fibrosa. No es necesario decir que cuando los metales son frágiles en todas las condiciones puede ser siempre $T_u = T'_u$, pero entonces se observará en los dos casos fracturas intercristalinas y con valores muy bajos para el trabajo específico.

Si sustituímos en la fórmula los valores numéricos correspondientes a los tipos I y II de ejemplares, tendremos:

$$T_u = \frac{T}{296.7\beta}$$

$$T'_u = \frac{T_1}{63.5\beta}$$

$$\frac{T_u}{T'_u} = \frac{63.5\,T}{296.7\,T'} = 0.214\,\frac{T}{T'}$$

T y T' son los trabajos totales empleados en romper las barras del tipo I y del tipo II, respectivamente. Por consiguiente, para que el metal no sea frágil es necesario que $\frac{T}{T'} \gtreqless 4.673$. De esta manera puede determinarse fácilmente el valor del *índice de fragilidad*, que resultará tanto mayor cuanto más frágil sea el metal.

Es interesante hacer notar que en algunos de los ensayos ejecutados en los laboratorios del Instituto de Ensayo de Materiales este método permitió relevar la fragilidad de algunos metales que habían dado excelentes resultados en los ensayos estáticos ordinarios y en algunos casos también en la flexión por choque sobre barras entalladas. En esos casos se observó para las barras del tipo II fracturas características de los metales frágiles y valores del índice de fragilidad hasta de 37.3. Creemos, en consecuencia, que la aplicación de este método presenta reales ventajas.

CAPITULO XI

ENSAYOS DE DUREZA

Definiciones y clasificación. — Se define generalmente la dureza diciendo que es la resistencia opuesta por un cuerpo a la penetración de otro.

Con el fin de facilitar el estudio de esta propiedad se han propuesto varios procedimientos que pueden clasificarse en los siguientes grupos:

I) — Procedimiento por ~~penetración~~ rayado.

II) — Procedimiento por penetración.

III) — Aparatos pendulares.

IV) — Aparatos de reacción elástica.

I. **Procedimiento por rayado.** — En los procedimientos por rayado puden distinguirse dos casos. En el primero se usa como término de comparación una serie o escala de cuerpos tipos de dureza conocida y en el segundo se hace la comparación con un solo cuerpo tipo. La utilización de una escala de cuerpos con los que se compara, mediante la operación de rayado, el material cuya dureza hay que determinar, es el procedimiento más empleado en Mineralogía.

Se han propuesto muchas escalas. Weiner, por ejemplo, divide los cuerpos según su dureza en cuatro grupos:

1) *Duros* los que dan chispas con el eslabón; a su vez pueden subdividirse en: 1) resistente a la lima; 2) difícilmente trabajables con la lima; 3) trabajables con la lima.

2) *Semiduros,* trabajables con la lima o con el cuchillo, pero que no dan chispas con el eslabón.

3) *Blandos,* que se rayan con el cuchillo pero no con la uña.

4) *Muy blandos,* que se rayan con la uña.

Mohs, propuso la escala conocida con su nombre, que ha sido casi

unánimemente adoptada en Mineralogía. La escala está formada por los diez cuerpos que se indica a continuación:

1.°) Talco laminado conocido por talco de Venecia.

2.°) Sulfato de cal prismático; una variedad poco divisible y poco transparente. Las variedades perfectamente transparentes y cristalizadas son, en general, demasiado blandas. Se puede sustituir esta variedad de yeso con la sal gema hexaédrica.

3.°) Espato calcareo romboédrico; una variedad divisible.

4.°) Espato flour octaédrico; una variedad divisible.

5.°) Apatita; cal fosfatada romboédrica.

6.°) Feldespato laminoso; una variedad divisible.

7.°) Cuarzo; una variedad incolora.

8.°) Topacio prismático; cualquier variedad simple.

9.°) Coridon hialeno; la variedad de Bengala.

10.°) Diamante octaédrico.

Según la escala precedente, el ensayo de un material cualquiera, se hace tratando de rayar con uno de sus ángulos los tipos de la escala, empezando por el más duro. Cuando se llega al primero, que sin ninguna especie de dudas se deja rayar, se prueba sobre la lima: este tipo, el material en estudio y el tipo de la escala inmediatamente superior, teniendo la precaución de que los ángulos se encuentren en las mismas condiciones.

Se aprecia entonces, por la resistencia que los tres cuerpos ofrecen sobre la lima y por el ruido que resulta de su frotamiento sobre ella, las relaciones recíprocas de su dureza, y se representa la dureza del material ensayado por la cifra del tipo inferior al que se ha comparado, agregando por aproximación la cifra correspondiente a las décimas. El único objeto perseguido al utilizar la lima es, por consiguiente, obtener un medio para subdividir la escala. Es posible así dividir en diez partes el intervalo comprendido entre cada dos grados consecutivos. Sin embargo únicamente en casos excepcionales se lleva la aproximación a más de 0.5.

Los cuerpos tipos que forman la escala deben ser elegidos de manera que presenten caras planas y brillantes. No deben pulirse artifi-

cialmente, porque con esta operación pierden algunas veces dureza. En cuanto a los ángulos conviene que sean los mismos en los tipos de la misma forma; ángulos diferentes pueden influir mucho sobre los resultados.

Leunis completó la escala de Mohs, haciendo notar que la dureza de los cuerpos que forman los dos primeros grados corresponden a la de los materiales que se dejan rayar por la uña. Que la del tercero corresponde a una moneda de cobre. Que una hoja flexible de hierro tiene una dureza de 4.5. Que un vaso de vidrio ordinario tiene una dureza de 5.5. Que a una lima corresponde una dureza de 6.5. Que los tres últimos cuerpos de la escala rayan el vidrio y que los dos últimos lo cortan.

Dumas clasificó los metales por orden de dureza en la forma siguiente:

Más duro que el acero templado	Manganeso
No rayados por el vidrio	Cromo Rodio
Rayados por el vidrio	Níquel Cobalto Hierro Antimonio Zinc
Rayados por el espato calcáreo	Platino Paladio Cobre Oro Plata Bismuto Cadmio Estaño
Rayado por la uña	Plomo
Blandos como la cera a 15°C	Potasio Sodio
Líquido	Mercurio

Gollner propuso que se sustituyera, en el estudio de los metales, la escala Mohs por una escala de tipos metálicos. Cada uno de los tipos tendría la forma de un lápiz cilíndrico terminado en punta. Para ejecutar un ensayo se empieza por pulir cuidadosamente una superficie plana de metal cuya dureza se desea conocer y luego se presentan normalmente a ella los diferentes lápices cargados con un peso constante.

La escala de Gollner está constituída en la siguiente forma:

Plomo dulce puro.
Estaño puro.
Plomo duro.
Cobre recocido puro.
Cobre colado puro.
Bronce dulce (85 % Cu. — 10 % Sn. — 5 % Zn.).
Fundición recocida.
Hierro pudelado con nervios.
Fundición grís clara, de grano fino.
Fundición dura (refundida con el 10 % de hierro pudelado).
Acero dulce (0.15 % de C.).
Acero semidulce (0.45 % de C.).
Acero duro (0.96 % de C.).
Acero templado.
Bronce duro (83 % Cu. — 17 % Zn.).

Mîller utilizó para el estudio especial de los aceros otra escala metálica formadas por acero de cementación, recocidos y templados, cuya proporción de carbono crecía de milésimo en milésimo.

Sclerómetros. Vamos a considerar ahora los procedimeintos en que la dureza se hace tomando como término de comparación un solo cuerpo tipo. Osmond, en un trabajo muy completo sobre la determinación de la dureza de los cuerpos — presentado a la Comisión Francesa de Métodos de Ensayo — denominó a los ensayos basados en este principio: *ensayos cuantitativos.*

El primer instrumento de medida fué ideado por Seebck, que lo designó con el nombre de: *Sclerómetro.* Se compone principalmente de una punta vertical que actúa normalmente sobre la superficie pulida del cuerpo en ensayo, cargada con un peso conocido y animada de un movimiento de traslación. El sclerómetro permite aplicar cuatro métodos para la medida de la dureza.

a) — Determinación del peso mínimo con que es necesario cargar la punta para obtener una línea de cierto ancho.
b) — Determinación del ancho de la raya hecha con una punta cargada con un peso constante y animada de una velocidad dada.
c) — Determinación de la fuerza tangencial necesaria para arastrar la punta cargada con un peso dado.
d) — Determinación del número de veces que es preciso pasar la punta sobre una misma línea para obtener la primera raya visible. Es entendido que la carga de la punta debe ser lo bastante pequeña para que no produzca dicha raya visible luego del primer pasaje.

II. **Procedimiento por penetración.** — Los ensayos correspondientes a este grupo se ejecutan apoyando sobre el ejemplar un punzón de forma terminal dada y aplicando sobre dicho punzón, en la dirección de su eje longitudinal, una carga estática que puede aumentarse gradualmente. Sin embargo, en algunos casos la carga estática es sustituída por una carga dinámica, es decir, se somete el punzón a un efecto de choque de trabajo conocido. El cuerpo debe estar firmemente apoyado sobre una base rígida de mayor volumen. Los resultados del ensayo pueden expresarse indicando la superficie, la profundidad, el diámetro, etc. de la impresión o huella producida por una carga constante o bien la relación existente entre dicha carga y la huella respectiva. En algunos métodos, ya en desuso, se prescribía como factor constante las dimensiones de la huella y como valor a determinar, la carga necesaria para producir dicha huella.

Los punzones son de acero duro o de diamante. Es conveniente disponer de una serie de cuerpos de dureza conocida, sobre los que se verificará frecuentemente la invariabilidad de los punzones en uso.

Entre los procedimientos que se emplean generalmente en la actualidad figuran los de Brinell, Ludwik, Rockwell, Vickers, y Monotron Shore.

Procedimiento Brinell— Según este procedimiento, se determina la cifra o coeficiente indicativo de la dureza con una esfera de acero duro, sobre la cual actúa, una carga aumentada gradualmente durante un espacio de tiempo hasta alcanzar un valor máximo mantenido constante durante un espacio de tiempo, también establecido.

Dicho coeficiente, llamado también *número de Brinell* — que se designa con la letra *H*, está determinado por la relación entre la carga máxima aplicada expresada en kilogramos y la superficie de la hue-

lla expresada en milímetros cuadrados. Siendo P la carga aplicada y S la superficie del casquete esférico que constituye la huella dejada en el cuerpo por la esfera, el coeficiente H será por consiguiente:

$$H = \frac{P}{S}$$

La medida de la superficie S puede hacerse en función del diámetro d o de la profundidad a de la huella. En la práctica, la medida del diámetro d puede presentar dificultades a causa del reborde o de la depresión, que se producen algunas veces en el contorno de la huella. En cambio, la medida de la profundidad puede hacerse más fácilmente y con menor probabilidad de error con instrumentos especiales que permiten apreciarla durante la aplicación de la carga. Sin embargo este método es poco usado porque el valor registrado corresponde a la suma de las deformaciones elásticas y permanente, mientras que el dato que interesa realmente, en la práctica, es el que se refiere a esta última. Las fórmulas que pueden aplicarse para la determinación de H serán por consiguiente:

$$H = \frac{P}{\frac{1}{2}\pi D(D-\sqrt{D^2-d^2})}$$

$$H = \frac{P}{\pi D a}$$

En las que D representa el diámetro de la esfera.

Meyer propuso, como medida del coeficiente H la que resulta de

$$H = \frac{P}{\frac{\pi\ d^2}{4}}$$

Presenta interés e conocimienot del valor obtenido con esta fórmupor las aplicaciones de que ha sido objeto en estudios recientes acerca de algunas nuevas teorías sobre la Resistencia de Materiales.

El método Brinell tomó, casi desde su presentación, un gran desarrollo, por tratarse de un procedimiento rápido, de fácil ejecución, que no requiere mayores gastos en la preparación de ejemplares de ensayo y lo que es más interesante aún, que puede ejecutarse sobre las mismas piezas terminadas, sin ocasionar su inutilización o rotura.

Contribuyó además a su gran difusión la circunstancia de haber Brinell — fundado en los resultados de numerosas experiencias — sostenido que entre el valor de *H* y el de resistencia a la extensión existe una relación *K*, que puede considerarse como prácticamente constante. Para los aceros recocidos con una proporción de carbón inferior a 0.8 % sería: K = 0.346. Por consiguiente, multiplicando *K* por el número H el resultado obtenido sería — según Brinell — la carga de rotura a la extensión expresada en kg/mm².

Dillner propuso para el acero recocido a 860° con 0.1 a 1.2 % de carbono, los siguientes valores:

Para durezas menores de 175
Normalmente al laminado .... K = 0.362
Paralelamente al laminado .... K = 0.354
Para durezas mayores de 175
Normalmente al laminado .... K = 0.344
Paralelamente al laminado .... K = 0.325

Charpy a su vez, basándose en los resultados de sus experiencias, propuso dos coeficientes:

Para el acero dulce .... K = 0.351
" " " duro .... K = 0.336

Breuil decía que no había encontrado la concordancia indicada por Brinell entre la dureza y la resistencia a la extensión, pero que era preciso reconocer, no obstante, que el procedimiento lleva a una aproximación notable, por lo cual era un medio indirecto muy útil para la ejecución de ensayos rápidos. Posteriormente Breuil llegó a la conclusión de que el valor de *K* variaba entre 0.332 y 0.376.

Ast, después de efectuar una serie de ensayos sobre muestras de acero Martín, manifestaba en un trabajo presentado al Congreso de Bruxelas (1906), que si se colocan como abscisas las resistencias a la la extensión y como ordenadas los valores de *H*, resulta una línea casi recta que no pasa por el origen. Según Ast los valores de *K* varían entre 0.332 y 0.375.

Plrever, en su interesante libro sobre el procedimiento Brinell, resume en los siguientes términos su opinión al respecto:

"Los coeficientes *K* obtenidos por nosotros y por otros experimentadores no son una constante verdadera y propia. Es cómodo, en la práctica. considerarlos como tales, recordando sin embargo que los valores que

se utiizan son un promedio entre datos cuyos extremos distan notablemente entre sí. No hemos podido comprobar la existencia de una proporcionalidad verdadera y propia entre la dureza y la resistencia a la extensión, como lo admiten aun muchos autores y experimentadores. Existe entre dureza y resistencia una relación análoga a la que, en campo bien diferente, se ha apreciado entre altura barométrica y fenómenos meteorológicos. En línea de máxima se admite, para nuestras regiones, un paralelismo entre las dos variables, lo que no excluye que se produzcan notables excepciones. Esto no quita mucho valor a la prueba le dureza que permite asegurar una característica muy importante de los materiales. Para las exigencias de la práctica, el uso de los coeficientes hecho con la debida cautela, será siempre una poderosa ayuda en el reconocimiento rápido y sumario de los metales”.

En el cuadro siguiente, tomado de la misma obra de Prever figuran los coeficientes propuestos por los diferentes autores que han ensayado preferentemente aceros de carbono.

Autores	Grados de dureza	Aceros no templados		Aceros templados y recocidos a 500°-700°
		Normal al laminado	Paralelo al laminado	
Brinell	Dulce	——	0.346	——
	Duro	——		——
Dillner	$H \leqq 175$	0.362	0.354	——
	$H > 175$	0.344	0.324	——
Charpy	Dulce	0.351		——
	Duro	0.336		——
Breuil	Dulce	0.376		——
	Duro	0.332		——
Ast	Dulce	0.375		——
	Duro	0.332		——
Grard	Dulce	0.358	0.343	0.346
	Duro	0.351	0.329	0.318

De los datos contenidos en el cuadro se deduce que el valor K puede oscilar entre un mínimo de 0.318 y un máximo de 0.376. Por lo que si un acero tiene una dureza igual a 300 y no se tiene ninguna referencia con respecto a su naturaleza y al tratamiento sufrido, en la duda de usar uno u otro coeficiente, no se podría asegurar si el acero tiene una resistencia de 95 o de 113 kg/mm². En algunos ensayos ejecutados sobre aceros en el Instituto de Ensayo de Materiales se han encontrado excepcionalmente valores muy inferiores, hasta de $K = 0.233$.

Puede establecerse con carácter general que: 1.º Para los aceros duros el coeficiente K tiene valores menores que para el acero dulce 2.º Que la dureza determinada en dirección normal al laminado da para K valores superiores que si es determinada paralelamente al mismo.

La influencia ejercida sobre el valor del coeficiente Brinell, por cada uno de los factores que intervienen en su determinación, ha sido objeto de muy numerosos estudios. Tanto el diámetro de la esfera como el valor de la carga y el tiempo durante el cual se hace actuar a ésta, han dado motivo a investigaciones de verdadero interés.

Malmtrön, Prever y Thomas, Benedicks, Le Chatelier, Mayer, Moore, Thomas, etc., propusieron fórmulas relacionando dichos factores. Sin embargo, se ha considerado conveniente — tal como en el caso de los ensayos de fragilidad y otros — establecer, en forma convencional, normas fijando el valor de cada uno de esos factores. Se consigue así que los resultados obtenidos sobre un mismo material sean siempre los mismos, aun cuando sean ejecutados en diferentes laboratorios y por diferentes operadores. Las principales prescripciones contenidas generalmente en las normas en uso son las que se indican a continuación:

La determinación de la superficie de la huella debe hacerse en función de su diámetro que debe medirse — con la aproximación de 0.01 mm. — con un microscópio provisto de ocular micrométrico. Se tomará como resultado el promedio de dos diámetros perpendiculares entre sí.

Se podrán emplear esferas de 10, 5 y 2.5 mm. de diámetro, con la tolerancia de ± 0.5 %.

La carga a aplicarse será la que indica en el cuadro siguiente:

Diámetro de la esfera (D) mm.	Carga (F) en Kgs					
	$30\ D^2$	$10\ D^2$	$5\ D^2$	$2.5\ D^2$	$1.25\ D^2$	$0.5\ D^2$
10	3000	1000	500	250	125	50
5	750	250	125	62.5	31.2	12.5
2.5	187.5	62.5	31.2	15.6	7.8	3.1

Se admite que sólo son comparables los resultados correspondientes a una misma columna; los resultados correspondientes a las filas horizontales no son, en general, concordantes. La carga será establecida para que : $0.2D < d < 0.5D$.

Para los metales y aleaciones indicados en el cuadro que sigue se utilizará de preferencia las siguientes cargas:

Metales y aleaciones	Carga (F) kgs.
Aceros y fundiciones	$30\ D^2$
Aleaciones de cobre y aluminio	$10\ D^2$
Cobre y aluminio	$5\ D^2$
Plomo, estaño y aleaciones	2.5 / 1.5 / 0.5 D^2

Después de realizado el ensayo no debe quedar ninguna marca en la cara opuesta a aquella en que se aplicó la carga.

En ninguna circucnstancia se ensayarán ejemplares cuyo espesor sea menor que el diámetro de la esfera. En este caso hay que superponer varios ejemplares del mismo material hasta tener el espesor correspondiente.

La superficie del ejemplar debe ser plana y pulida para que pueda medirse, con la exactitud requerida, el diámetro de la impresión.

Al preparar el ejemplar se tomarán las precauciones necesarias para evitar el calentamiento del material o su endurecimiento superficial.

Durante el ensayo las superficies de contacto deben estar libres de cuerpos extraños (aceites, etc.).

El ejemplar debe apoyarse perfectamente sobre el soporte para impedir su movimiento durante el ensayo.

El centro de la huella debe distar por lo menos 2 d del borde del ejemplar y 3 d del centro de otra huella. La carga debe ser aplicada perpendicularmente a la superficie y en forma gradual. En el caso de aceros la carga debe alcanzar su valor máximo en 15 segundos y ser mantenida constante durante otros 15 segundos. Para metales muy blandos como el plomo el tiempo de aplicación puede aumentarse hasta 3 minutos.

Al expresar los resultados del ensayo se indicará además de la cifra respectiva, el diámetro de la esfera (en mm.), la carga (en kgs.) y el tiempo de acción de la carga, (en segundos). Por ejemplo, en un ensayo efectuado con $D = 10$ mm.: $F = 3000$ kg. y $t = 30$ segundos, se expresará $H_{10/3000/30}$

Procedimiento Ludwik — En el procedimiento propuesto por Ludwik, la esfera es sustituída por un cono de acero duro de 90 grados de abertura. El coeficiente de dureza se determina, como en el caso anterior, dividiendo la carga expresada en kilogramos por la superficie de la huella expresada en milímetros.

Dicho coeficiente puede calcularse con la fórmula:

$$H = 0.225 \frac{P}{t^2}$$

en la que t es la penetración producida.

La ventaja de este procedimiento consiste en que hace más difícil la producción de rebordes y depresiones y que la simple medida de t permite conocer el diámetro $d = 2\ t$ de la huella. No obstante si se deseara referir la dureza a la deformación permanente sería necesario calcular la superficie de la huella en función de diámetro d medido directamente.

Procedimiento Rockwell — La determinación de la dureza Rockwell se obtiene comprimiendo sobre la superficie del metal en estudio un punzón cónico o esférico, llamado penetrador, al que se le aplica una carga inicial F_0 que es incrementada luego con una carga

adicional F_1. Se mide el aumento de la penetración e, después de suprimida la carga F_1, mientras sigue actuando F_o.

La dureza Rockwell HR se expresa por una cifra igual a:

$$HR = C - e$$

C es una constante fijada arbitrariamente, que vale 100 cuando se utiliza el penetrador cónico y 130 cuando se emplea el penetrador esférico.

La dureza Rockwell se designa HR_c, y HR_b, según sea determinada con el penetrador cónico o con el penetrador esférico.

El penetrador cónico es un cono con punta de diamante de las siguientes características:

Angulo del cono .... 120°
Radio del casquete esférico en la punta del cono ...... 0.2 mm.

El penetrador esférico es una bolilla de acero duro templado de mm. 1.588 de diámetro (1/16").

Las condiciones normales del ensayo son las siguientes:

Especificación	Dureza Rockwell HR_c	Dureza Rockwell HR_b
F_o	10 kg.	10 kg.
F_1	140 "	90 "
$F_o + F_1$	150 "	100 "
Número de dureza	$100 - e$	$130 - e$

El penetrador cónico se emplea para ensayar materiales cuya dureza Rockwell es superior a 20 HR_c y el penetrador esférico para aquellos cuya dureza es inferior a 100 HR_b.

La unidad convencional de longitud para medir el incremento de penetración e es igual a 0.002 mm.

La superficie del ejemplar debe ser plana y lisa y debe tomarse

todas las precauciones necesarias para evitar que se produzcan modificaciones en el material por calentamiento o endurecimiento en frío.

Podrá ensayarse materiales con superficies curvas, siempre que el radio de curvatura sea superior a 5 mm. En ningún caso se ensayarán ejemplares o piezas cuyo espesor sea menor que 10 *e*.

Después de realizado un ensayo no debe quedar ninguna señal en la cara opuesta a aquella en que se aplicó el penetrador. La pieza o ejemplar debe apoyarse perfectamente sobre el soporte para evitar su movimiento durante el ensayo. La carga debe actuar normalmente a la superficie del cuerpo. La superficie del ejemplar tiene que estar exenta de todo cuerpo extraño, (aceite, pintura, etc.).

El centro de una impresión debe distar, por lo menos, 3 mm. del borde la pieza o del centro de otra impresión.

Las máquinas empleadas para la determinación de la dureza, permiten, en general, que se lea directamente los valores de *HRc* o *HRb*.

Procedimiento Vickers — Según este procedimiento la dureza es determinada con una punta de diamante en forma de pirámide, de base cuadrada, y cuyo ángulo en el vértice es de 136°. La carga aplicada varía entre 5 y 60 kgs. El resultado se expresa por la medida de la diagonal de la impresión cuadrada producida en el ejemplar. Esta medida se hace con ayuda de un microscopio que se encuentra colocado en la misma máquina de ensayo, y que permite la apreciación de 0.001 de milímetro.

Es posible calcular en función de las cifras Vickers los números correspondientes de Brinell, pues existe proporionalidad entre ambos resultados. Existen cuadros preparados a ese efecto.

Dado que el ángulo de la pirámide es de 136°, la cifra Vickers es siempre equivalente, cualquiera sea la profundidad, a la de una impresión esférica cuyo diámetro d es igual a $0.375\ D$, como lo demuestra la fig. 49.

Procedimiento Monotron Shore — Consiste en la utilización de una esfera de diamante cuyo diámetro $D = 0.75$ mm. La dureza está expresada por la carga necesaria para producir una impresión de profundidad igual a $\frac{9}{200}$ mm.

Procedimiento de penetración por choque — Consiste en producir una huella utilizando una esfera sobre la que se deja caer un peso P desde una altura A.

Este ensayo no ofrece ninguna ventaja sobre el procedimiento Brinell, excepto en el caso de que deban ensayarse piezas de un gran volumen, cuya colocación en una máquina estática pudiera ofrecer dificultad.

Es indispensable que la energía aplicada a la esfera sea íntegramente utilizada en la formación de la huella; a este efecto, si la pieza a ensayar no fuera suficientemente pesada, debe ser sólidamente fijada sobre un yunque de mucho peso y gran rigidez. Son, en general, aplicables a este procedimiento de ensayo, las condiciones establecidas para el método Brinell.

III. — **Aparatos Pendulares** — La observación de las oscilaciones de un péndulo que descansa, por intermedio de una esfera o un

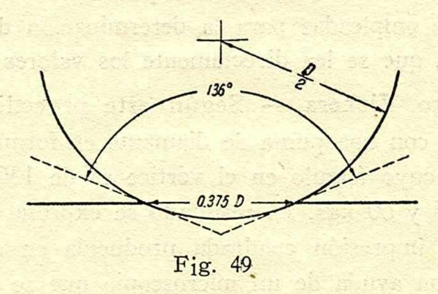


Fig. 49

cilindro de acero duro sobre el cuerpo en ensayo, es otro de los procedimientos propuestos para la determinación de la dureza. Este tipo de ensayo fué propuesto por Rolland. La duración de las oscilaciones depende de la dureza del soporte.

El *péndulo Herbert* está constituído por una masa de fundición en forma de arco que tiene en su medio una esfera de acero duro de un milímetro de diámetro. El centro de gravedad del péndulo coincide con el centro de oscilación. El ensayo se efectúa colocando el péndulo sobre el ejemplar de ensayo y apartándolo ligeramente de su posición de equilibrio hasta una posición que se aprecia exactamente. Se puede entonces medir la duración o la amplitud de la primera oscilación. La duración es inversalmente proporcional a la dureza y la amplitud directamente proporcional.

Rolland propuso recientemente un tipo de péndulo realizado por Bouty. Este péndulo se diferencia del anterior en que la distancia entre el centro de gravedad y el centro de oscilación es relativamente grande, con lo cual se asegura una mayor estabilidad del aparato.

La pequeña deformación producida en el cuerpo por el peso del péndulo disminuye la duración de la oscilación, la que es apreciada, por comparación, con otro péndulo de período invariable por el método de las coincidencias. El intervalo que separa dos coincidencias de los péndulos está en razón inversa del diámetro de la superficie de contacto de la esfera y del cuerpo y es utilizado como medida convencional de la dureza del cuerpo. La esfera, que es de rubí, mide también un milímetro de diámetro.

IV — **Aparatos de reacción elástica** — La apreciación de la dureza, según este método, consiste en medir la altura del rechazo de una pequeña maza que cae en el interior de un tubo vertical, desde una altura determinada, sobre el material de ensayo. Cuanto más duro sea este, tanto mayor será la altura del rechazo, la que, medida sobre una escala convencional dará la cifra indicativa de la dureza.

La altura del rechazo, dice Cazaud, se relaciona más con la elesticidad del material que con su dureza, definida como la resistencia a la penetración. Es así como el caucho puede dar un rechazo del mismo orden que el acero dulce.

El Scleroscopio Shore se compone de un tubo vertical de vidrio, graduado de 0 o 140, en cuyo interior cae una pequeña maza de acero de 7 gramos de peso, terminada en un cono de diamante de punta embotada. Después del ensayo la maza es llevada neumáticamente al extremo del tubo.

Un aparato francés llamado Sclerógrafo consiste en un tubo de acero en cuyo interior se desliza sin rozamiento una varilla de acero especial templado, que tiene en su extremo inferior una esfera de 5 mm. muy dura e intercambiable. El peso conjunto es de 50 gramos. La altura de caída es de 100 mm. Después del choque la varilla queda retenida a la altura del rechazo, la que se puede leer en una escala.

Drouillard ha demostrado que este ensayo puede suministrar indicaciones múy útiles acerca de la cohesión, la maleabilidad y la fragilidad de diferentes materiales.

Si en lugar de efectuar un solo choque se repite la operación en diferentes lugares, se puede deducir conclusions interesantes sobre la dureza local y sobre la heterogeneidad del material.

Si se repite los choques en un mismo punto y se anota la altura del rechazo para cada uno de ellos, se comprueba que ésta tiende hacia

un valor límite. El número de choques necesario para alcanzar este valor es una característica del material.

Los materiales frágiles se caracterizan, en general, por una disminución más o menos rápida en la altura de rechazo con el número de choques.

CAPITULO XII

ENSAYOS DE FORJADO

Clasificación — Conforme a lo establecido en el Congreso de Bruxelas (1906) clasificaremos estos ensayos tecnológicos en cuatro grupos: 1.° — Ensayos de aplastamiento; 2.° — Ensayos de recalcamiento; 3.° — Ensayos de punzonado; 4.° — Ensayos de agrandamiento de un agujero.

Ensayos de aplastamiento — Los ensayos de aplastamiento pueden ejecutarse con un martillo o con un martinete de gran velocidad.

La maza del martillo o del martinete estará terminada por una parte cilíndrica de 15 mm. de diámetro y golpeará transversalmente a la dirección en que se desee producir el aplastamiento.

El ejemplar debe tener un ancho igual al triple de su espesor y deberá ser ensanchado o alargado en uno y medio o dos veces su ancho.

Como medida de ensanchamiento de b masta b' o para el aplastamiento de e hasta e' se tomarán los valores:

$$100 \frac{b'}{b} \quad \text{o} \quad 100 \frac{e'}{e}$$

obtenidos antes de la aparición de la primera grieta.

Ensayos de recalcamiento — Estos ensayos también se ejecutan con martillos o martinetes a gran velocidad.

Los ejemplares serán, en lo posible, cilindros de altura igual al doble del diámetro. La medida del recalcamiento está dada por la disminución de la altura inicial expresada en tanto por ciento hasta la aparición de la primera grieta.

Ensayos de punzonado — Este ensayo, que se efectúa sobre el yunque, tiene por objeto determinar hasta que distancia de una de las aristas se puede perforar, sin que se agrieten los bordes del agujero, un ejemplar calentado al rojo claro cuyo ancho es, como mínimo, igual a cinco veces su espesor.

Como resultado del ensayo se toma la relación existente entre el espesor del ejemplar y el doble de la distancia entre la circunferencia del agujero y la arista del ejemplar.

Ensayo de agrandamiento de un agujero — Se ejecuta este ensayo sobre un ejemplar, calentado al rojo claro, cuyo ancho es igual a cinco veces el espesor.

Se empieza por perforarlo con ayuda de un martillo y de un punzón, de manera que el agujero tenga un diámetro igual al doble del espesor del ejemplar.

El agujero es agrandado después con un punzón troncocónico, hasta que se produzcan las primeras grietas. La conicidad de este punzón será tal que su diámetro aumente a razón de un milímetro por cada centímetro de longitud.

Si es preciso, se volverá a calentar el ejemplar todas las veces que sea necesario; se introducirá el punzón alternativamente por uno y otro lado para evitar la formación de aristas agudas.

Como medida del ensanchamiento obtenido se toma el valor:

$$100 \frac{d'}{d}$$

d es el diámetro primitivo del agujero y d' el diámetro agrandado.

CAPITULO XIII

ENSAYOS DE DESGASTE

Clasificación — Los ensayos de desgaste pueden ser clasificados en dos grupos: 1.° — Ensayos de desgaste por rozamiento; 2.° — Ensayos de desgaste por rozamiento y choque simultáneo.

Ensayo de desgaste por rozamiento — Este ensayo se aplica principalmente en el caso de materiales destinados a pavimentación: baldosas, losas, piedras naturales y artificiales, etc.

Una de las máquinas más usadas para este tipo de ensayo es la *máquina Dorry*. Consistente en una plancha circular de fundición que gira alrededor de un eje vertical que pasa por su centro. Este eje está sostenido en su parte superior por una pieza horizontal en la cual existen dos dispositivos que permiten colocar debidamente sujetos dos ejemplares del cuerpo en ensayo. La distancia entre el eje de giro de la plancha circular y el eje de los ejemplares es fija. Sobre los ejemplares es posible disponer pesos conocidos para aumentar la presión del ejemplar contra la plancha.

Al mismo tiempo que el movimiento de traslación alrededor del eje central de la máquina, se produce un movimiento de rotación de los ejemplares alrededor de sus propios ejes.

La forma de los ejemplares es generalmente la de un prisma de 4 cm. de ancho por 6 cm. de largo y 8 cm. de altura. Este aparato — cuando la distancia del eje de rotación al eje del ejemplar no puede hacerse variar—presenta el inconveniente de que el ejemplar tiene que recorrer constantemente la misma zona de la plancha, lo cual produce con el tiempo un desgaste de esta, la que perderá por consiguiente la llanura de su superficie. Por lo tanto es indispensable que se verifique antes de cada ensayo el estado de la plancha, para corregir si fuera preciso, mediante un cepillado, los desniveles o la concavidad que existiera.

Los ensayos se ejecutan simultáneamente sobre dos ejemplares de un mismo material. La clase, cantidad y grosor del material raspante — generalmente arena — y la cantidad de agua que se verterá sobre la

chapa durante el ensayo, así como la velocidad del movimiento, el número de vueltas o el recorrido total en metros y la presión ejercida sobre el ejemplar, se hallan estipulados en las normas o especificaciones respectivas.

El resultado del ensayo se expresa indicando la pérdida del peso o la disminución de altura experimentada por el ejemplar al cabo de N vueltas o luego de un recorrido de M metros.

Este procedimiento de ensayo presenta el inconveniente de que el polvo proveniente del desgaste del material en ensayo se puede mezclar con la arena, lo cual podría influir sobre los resultados al variar las condiciones estipuladas para la ejecución de la prueba.

Este inconveniente está subsanado en el *aparato Gary*, en el cual el desgaste es producido por un chorro de arena proyectado sobre el ejemplar. La arena se dirige contra el ejemplar utilizando vapor de agua perfectamente seco o aire comprimido a la presión de tres atmósferas durante un espacio de tiempo determinado; generalmente dos minutos. Se puede expresar el resultado indicando el volumen desgastado calculado por la fórmula:

$$\frac{P - P_1}{D}$$

en la que P y P_1 son el peso del ejemplar, en estado seco, antes y después del ensayo respectivamnte, y D la densidad del material.

Ensayo de desgaste por rozamiento y choque simultáneo — Este ensayo se ejecutaba sobre la piedra partida destinada a la construcción de pavimentos de macadam, pero en la actualidad se efectúa también sobre la piedra partida destinada a la fabricación de hormigones. Las máquinas utilizadas son la *Deval* y la de *"Los Angeles"*.

La máquina *Deval* consiste en uno o más recipientes cilíndricos de 20 cm. de diámetro interior y 34 cm. de longitud, inclinados con un ánguno le 30 grados sobre un eje horizontal. El movimiento de rotación es producido por un motor eléctrico que los hace girar a razón de dos mil vueltas por hora. Un contador de vueltas provisto de un dispositivo automático colocado en uno de los extremos del eje permite detener la marcha del aparato a las diez mil vueltas.

El ensayo se realiza en la siguiente forma: se pesa después de bien lavados y desecados, cinco kilogramos de material, cuyos trozos deben ser lo más uniformes posibles y de dimensiones tales que pasen en

todos sentidos por un aro de seis centímetros de diámetro y no lo hagan por otro de cuatro centímetro de diámetro. Se coloca estos cinco kilogramos de material en uno de los recipientes cilíndricos. Enseguida se le cierra herméticamente y se le hace girar las diez mil vueltas establecidas.

Durante el ensayo los trozos de piedra recorren el recipiente en el sentido de su longitud dos veces por cada vuelta, produciéndose un desgaste por choque y por rozamiento tanto entre sí como con las paredes del cilindro.

Se abre luego el cilindro y se vierte todo su contenido sobre un caja cuyo fondo está constituído por una chapa perforada con agujeros que miden mm. 1.6 de diámetro. Allí se lava cuidadosamente cada piedra frotándola con un cepillo a fin de quitarle todo el polvo que tuviera adherido.

Llamemos P al peso expresado en gramos de todo el material, después de desecado, que no haya pasado a través de la chapa perforada. La relación:

$$\frac{5000 - P}{5000}$$

expresa el valor del coeficiente *Deval* de desgaste.

La *Máquina "Los Angeles"* consiste en un recipiente cilíndrico de las siguientes dimensiones interiores: diámetro cm. 71.12; longitud cm. 50.80. Este recipiente se halla cerrado herméticamente por sus dos bases, a las cuales está fijado un eje horizontal que no atraviesa el recipiente y que se halla colocado exactamente según la longitud del eje del cilindro. Sujeta rígidamente a la superficie interior del recipiente y en toda su longitud — siguiendo la dirección de una de sus directrices — se halla colocada una plancha metálica de un ancho de cm. 8.89 medida normalmente a la superficie cilíndrica.

El ensayo se ejecuta colocando en el interior del recipiente, que se halla provisto en la parte cilíndrica de una tapa de cierre hermético, cinco kilogramos del material a ensayar y una cantidad de esferas de acero duro de cm. 4.76 de diámetro y 390 a 445 gramos de peso cada una. Dicha cantidad de esferas está fijada en las normas respectivas, de acuerdo con la constitución granulométrica del material de ensayo.

La máquina gira a la velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto y el ensayo corresponde a un total de 500 revoluciones.

En ensayo se termina como en el caso anterior, pero con la diferencia de que la separación del material desgastado se hace usando un tamiz de 1.68 de abertura, en lugar de la chapa perforada.

CAPITULO XIV

ENSAYOS FISICOS

Peso específico — Se define el peso específico de un cuerpo diciendo que es el peso, expresado en gramos, de materia contenida en un volumen de un centímetro cúbico. Es indispensable, por lo tanto, que al determinar el valor de esta constante se excluya el volumen correspondiente a los huecos, vacíos o poros existentes entre las partículas constitutivas del cuerpo.

Corresponde a la Física el estudio detallado de los métodos que deben seguirse para obtener — con la máxima aproximación posible — el valor del peso específico. Si todos los ensayos exigieran una exactitud rigurosa, no habría más que recurrir a esos métodos y al empleo de los aparatos e instrumentos que poseen los laboratorios de Física.

En el ensayo corriente de los materiales de construcción basta conocer el peso específico con la aproximación dada por una sola cifra decimal. Para su determinación se utilizan *volumenómetros* y balanzas que aprecien hasta el medio centígramos.

El volumenómetro común no es más que un frasco de vidrio cuyo cuello se prolonga por un tubo vertical, también de vidrio, graduado en décimos de centímetro cúbico. Para efectuar un ensayo se llena el aparato, hasta un altura determinada, con un líquido en el que no sea soluble el material a ensayarse. Se introduce enseguida un peso conocido del material. Si el cuerpo no fuera absolutamente compacto, es decir si tuviera vacíos entre sus partículas, es necesario que sea previamente reducido al estado de polvo que pase por el tamiz de 900 mallas por centímetro cuadrado.

El aumento de nivel observado en el tubo graduado, luego de introducido el cuerpo, corresponde al volumen del material; por consiguiente, para obtener el valor del peso específico no habrá más que dividir el peso del material, determinado anteriormente, por dicho volumen.

Es indispensable que durante toda la operación — que debe efectuarse rápidamente — se mantenga constante la temperatura del volu-

menómetro, del líquido utilizado, del cuerpo en ensayo y del aire ambiente. Este temperatura se fija generalmente entre 15° y 20°C. Si no se cumplieran rigurosamente estas condiciones, podría incurrirse en errores graves, pues el aumento en el nivel del líquido contenido en el volumenómetro podría ser influído por la evaporación, o por las dilataciones producidas por las diferencias de temperatura.

El volumenómetro corrientemente usado en el ensayo de los materiales es el de *Le Chatelier et Candlot*. En este aparato (fig. 50) los dos trazos *a* y *b* limitan una ampolla cuyo volumen es exactamente

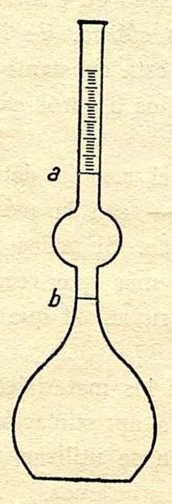


Fig. 50

de veinte centímetros cúbicos. La parte de tubo situada sobre el trazo *a* está dividida en décimos de centímetro cúbico.

El ensayo se ejecuta llenando el aparato con el líquido apropiado — generalmente bencina — hasta enrasar el trazo *b*. Se introduce enseguida un peso *P* del material cuyo peso específico se desea determinar. Este peso será variable según la naturaleza del material, pues debe procurarse que el nivel del líquido se mantenga dentro de la parte graduada del tubo. Así, por ejemplo, si se tratara de un cemento portland cuyo peso específico es aproximadamente 3.1 se toma un peso *P* de 63 a 64 gramos. El volumen V será igual a veinte centímetros cúbicos más el número de centímetros cúbicos y décimos de centimetros cúbicos leídos en la escala graduada.

El peso específico estará dado por el cociente: $\frac{P}{V}$

Puede procederse también — cuando no se tenga una idea aproximada del valor del peso específico a determinar — del siguiente modo: se pesa una cantidad suficientemente grande — por ejemplo cien gramos — de polvo y se echa luego en el aparato la cantidad necesaria para enrasar la línea *a*. Se tendrá así exactamente el volumen de polvo de 20 centímetros cúbicos. El peso de este volumen será la diferencia entre el peso primitivo y el peso del material sobrante. Este procedimiento ofrece el inconveniente de las dos pesadas, que aumenta las probabilidades de incurrir en errores.

Este volumenómetro se utiliza para la determinaión del peso específico de cementos, arenas, ladrillos, baldosas, tejas, piedras en general, etc.

Cuando se tratara de cuerpos absolutamente compactos, el valor del peso específico coincidirá con el de la densidad aparente. Por consiguiente, bastará con determinar esta última constante.

Densidad aparente — Llamamos densidad aparente al peso en kilogramos de un volumen equivalente a un decímetro cúbico del cuerpo de que se trate, tomado en su estado natural. Es evidente, como acabamos de manifestar, que en el caso de cuerpos absolutamente compactos, el peso específico y la densidad aparente tienen idéntico valor.

Cuando deba ensayarse cuerpos no compactos hay que distinguir dos casos: que el cuerpo se presente o no en estado de polvo. En el último caso se procede por medio de balanzas, que aprecien al decígramo, el peso de un trozo del cuerpo cuyo volumen se aprecie en decímetros y centímetros cúbicos.

Si el cuerpo tuviera una forma geométrica regular — como ocurre algunas veces, por haberse preparado ejemplares para otros ensayos — se puede deducir su volumen de la medida directa de sus dimensiones, que puede hacerse con la precisión de un décimo de milímetro, utilizando un calibrador corriente provisto de nonio.

Cuando la forma del cuerpo fuera irregular se puede medir su volumen con el *volumenómetro de mercurio de Breuil,* o con una balanza hidrostática.

Este volumenómetro (fig. 51) consiste en un recipiente cilíndrico de acero, cuyas dimensiones interiores son, aproximadamente, las siguientes: diámetro 50 mm.; profundidad 100 mm. Transversalmente al cilindro — es decir en posición horizontal — y en comunicación con su cavidad, está colocado un tubo en el que penetra a rozamiento

suave un pistón que puede moverse en ambos sentidos por medio de un tornillo micrométrico. Sobre una de las generatrices del cilindro existe una escala graduada en milímetros. Unido rígidamente al vástago del pistón se halla un tambor graduado — cuyo centro coincide con el tubo — dividido en cien partes. A cada rotación completa de este tambor el pistón avanza o retrocede un milímetro, haciendo variar el volumen ocupado por el mercurio.

El recipiente cilíndrico se cierra en su parte superior con una tapa de acero enroscada de cierre hermético. Esta parte tiene en su parte céntrica un tubo vertical de vidrio con un índice metálico deslizante.

La utilización de este aparato es la siguiente: se hace girar el tambor hasta que el mercurio enrace el índice del tubo vertical de vidrio. Se lee en la escala graduada y en el tambor la posición correspondiente.

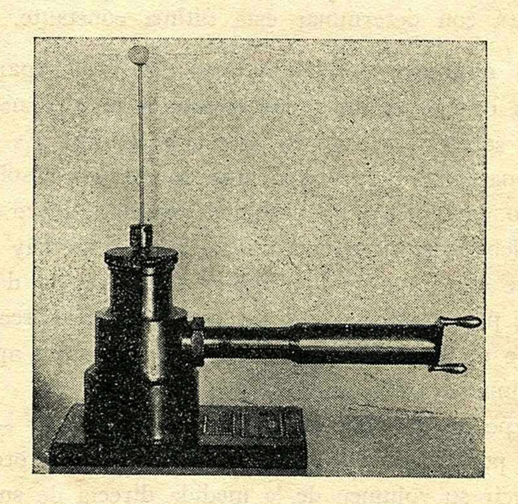


Fig. 51

Enseguida se hace retroceder el mercurio hasta un nivel inferior al de la tapa en dos o tres centímetros. Esta operación no presenta ninguna dificultad pues es muy fácil calcular el número de vueltas necesario. Se quita entonces la tapa, se coloca el ejemplar de ensayo en el interior de la cavidad, se vuelve a enroscar la tapa y se vuelve a hacer girar el tambor hasta que el mercurio enrase otra vez el índice del tubo de vidrio. Se hace la lectura correspondiente. La diferencia entre esta lectura y la anterior estimada en la escala correspondiente expresará el volumen del cuerpo.

Cuando se emplea la balanza hidrostática es necesario que la superficie del cuerpo sea revestida con una materia que impida la absorción capilar del agua. Una débil capa de cera fundida que se aplica con un pincel y se extiende con los dedos llena satisfactoriamente este objeto. La cantidad de barniz que puede llenar las cavidades superficiales del cuerpo es demasiado pequeña, si la operación se hace prolijamente, para que pueda ejercer influencia apreciable sobre los resultados.

El cuerpo debe sr pesado primeramente en el agua e inmediatamente después en el aire. Se obtiene así, en el caso de existir en la capa de barniz alguna solución de continuiadad, que hubiera permitido la absorción de alguna pequeña cantidad de agua, que ella quede contenida en el interior del cuerpo durante la segunda pesada y que la diferencia de peso no resulte en consecuencia falseada.

En todos los casos es necesario que previamente a la determinación del peso del cuerpo se proceda a su completa desecación. Para ello se le mantiene durante el tiempo que sea preciso en una estufa calentada a una temperatura que no produzca alteraciones en el material; generalmente a 105°C. Periódicamente se saca el cuerpo de la estufa y se le pesa. Se considera terminada la operación cuando en dos pesadas consecutivas se obtiene el mismo resultado.

En el caso de cuerpos en estado de polvo, la densidad aparente se determina hallando el peso de la cantidad de material contenido en un recipiente de un decímetro cúbico de capacidad. El valor de esta constante varía con el grado de tenuidad del polvo. Los productos provenientes de la trituración de un mismo material son tanto menos densos cuanto más pequeños son los granos de constituyen el polvo. Por consiguiente, para hacer posible la comparación entre los resultados obtenidos en diferentes ensayos de un mismo material — pero diferentemente triturado — es necesario que se indique especialmente su composición granulométrica, la que puede determinarse usando los procedimientos que estudiaremos al tratar lo relativo a este ensayo.

También ejerce influencia sobre los resultados la forma y las dimensiones del recipiente que se utilice para la medida del volumen y la forma de llenarlo. Los resultados no son iguales si el recipiente es de sección cuadrada o de sección circular, como también se llegará a un mismo resultado pesando directamente el volumen de un litro que multiplicando por n el peso de $\frac{1}{n}$ de litro.

El tipo normal que se ha adoptado es un recipiente cilíndrico de un decímetro cúbico de capacidad y diez centímetros de altura.

El método de llenarlo influye mucho sobre el resultado de la experiencia. Si se apisona enérgicamente el polvo, que manera que se obtenga el asentamiento máximo, puede obtenerse en algunos casos — por ejemplo si se trata de un cemento portland — resultados que están en la relación de 2:1 con el que se obtendría llenando el recipiente en las condiciones establecidas en las normas de ensayo generalmente aceptadas. Por esta circunstancia ha sido indispensable adoptar procedimientos que obliguen a proceder exactamente en las mismas condiciones en todos los casos. Solamente así pueden ser comparables los resultados del ensayo obtenido en diferentes laboratorios.

Entre los diferentes aparatos que se han propuesto, el generalmente usado en la actualidad es el *embudo normal francés*. Se trata de un aparato sencillo, de fácil construcción y manejo, y cuyo empleo permite llegar a resultados muy concordantes tanto si es usado por un mismo operador o por operadores diferentes.

Fué ideado por el Subcomité encargado de las experiencias, dependiente de la Comisión nombrada el 9 de Noviembre de 1891, por el Gobierno de Francia, con el cometido de formular las reglas uniformes a adoptarse en el ensayo de los materiales de construcción y para determinar las unidades o términos de comparación.

El aparato consiste en un embudo de sección circular, que mide dos centímetros de diámetro en su base y quince centímetros de diámetro a una altura de quince centímetros sobre dicha base. A esta altura se halla colocada una chapa perforada a razón de 1090 agujeros en dos milímetros de diámetro por decímetro cuadrado. El embudo se prolonga en su parte inferior por un tubo cilíndrico de dos centímetros de diámetro y diez centímetros de altura.

A una determinada distancia vertical — establecida en las normas de ensayo y variable con la clase de material ensayado — medida desde el extremo inferior del tubo, se encuentra situado el plano horizontal superior de la medida de un decímetro cúbico.

El embudo se halla sostenido por tres pies que lo mantienen a una altura fijada de acuerdo con lo que se acaba de expresar.

La materia en polvo se vierte sobre la chapa perforada por pequeñas cantidades; trescientos o cuatrocientos gramos. Se facilita el pasaje a través de la chapa con una espátula de madera de cuatro centímetros de ancho.

Se considera terminada la operación cuando la base del cono que se va formando en el recipiente cilíndrico alcanza el nivel superior del mismo. Se retira entonces el embudo y se quita enseguida el exceso de polvo haciendo deslizar sobre dicho borde una lámina bien recta que se mantiene en un plano vertical. Durante toda la operación es necesario cuidar que el recipiente cilíndrico no sufra ninguna sacudida o choque.

En el caso de ensayo de arenas se suprime la chapa perforada y se hace uso de un obturador que se halla colocado en el extremo inferior del tubo. Se ejecuta el ensayo cerrando este obturador y echando dentro del embudo una cantidad de arena equivalente a un litro y medio dio aproximadamente. Se abre entonces el obturador para que la arena caiga dentro del recipiente cilíndrico siguiendo la dirección de su eje. Cuando el vértice del cono, que se formará, llegue al extremo inferior del tubo obstruyendo la salida de arena, se cierra el obturador y se retira el embudo. Se continúa y termina luego el ensayo en la misma forma indicada antes.

Composición granulométrica — Se determina la composición granulométrica expresando los porcentajes en peso de los granos de tamaños determinados. A ese efecto será necesario dividir el total de la muestra en diferentes lotes, en cada uno de los cuales los granos que lo constituyen tendrán dimensiones comprendidas entre dos límites previamente fijados. Esta división puede hacerse de diferentes modos: con tamises, con chapas perforadas, con corrientes de agua y con corrientes de aire de velocidad conocida. En el caso de los cementos se usan generalmente los siguientes tamices:

1.°) Tamiz de 324 mallas por centímetro cuadrado, formadas con 18 hilos de mm. 0.20 de diámetro, por centímetro lineal.

2.°) Tamiz de 900 mallas por centímetro cuadrado, formadas con 30 hilos de mm. 0.15 de diámetro, por centímetro lineal.

3.°) Tamiz de 2025 mallas por centímetro cuadrado, formadas con

45 hilos de mm. 0.10 de diámetro, por centímetro lineal.

4.°) Tamiz de 4900 mallas por centímetro cuadrado, formadas con 70 hilos de mm. 0.05 de diámetro, por centímetro lineal.

En Inglaterra se usa corrientemente los siguientes tamices:

1.°) Tamiz de 32400 mallas por pulgada cuadrada, equivalente a 5022 mallas por centímetro cuadrado, o sea 180 hilos de 0.0018 de pulgada (mm. 0.046) de diámetro por pulgada lineal.

2.°) Tamiz de 5776 mallas por pulgada cuadrada, equivalente a 895 mallas por centímetro cuadrado, o sea 76 hilos de 0.0044 de pulgada (mm. 0.112) de diámetro por pulgada lineal.

En los Estados Unidos de la América del Norte la Sociedad de Ensayo de Materiales formuló en 1917, con la cooperación del Gobierno y de la Sociedad A. de Ingenieros Civiles, una serie de especificaciones para los ensayos del cemento portland en las que prescribe el empleo de un tamiz formado con 79 hilos por centímetro lineal, no debiendo en una parte cualquiera del tamiz, de un centímetro de longitud, haber menos de 76 ni más de 82 hilos. Ninguna abertura entre dos hilos consecutivos paralelos tendrá un ancho mayor de mm 0.127. El diámetro medio de los hilos será de mm. 0.053, no admitiéndose los que midan menos de m. 0.048 o más de mm. 0.058.

Con el fin de normalizar dentro de ciertas reglas los tamices destinados a ensayos de cementos, arena, gravillas, etc., la W. S. Tyler Company fabrica una serie de tamices en la que la separación de los hilos varía de un tamiz a otro proporcionalmente a la $\sqrt{2}$ Por consiguiente, la relación entre la superficie de las aberturas es en cada tamiz igual a la mitad de la correspondiente al tamiz que le precede y al doble del que le sigue. Como base se tomó el tamiz N.° 200, correspondiante a las especificaciones del "Bureau of Standards" de los Estados Unidos de América del Norte. Este tamiz está formado con 200 hilos de 0.0021 de pulgada, de diámetro y una separación igual a 0.0029 de pulgada (mm. 0.074) por pulgada lineal. Otros tamices de la Serie Tyler, como el núm. 100, el núm. 48 y el núm. 35, se corresponden con tamices aprobados por el "Bureau of Standards".

En el cuadro siguiente se indica las características de estos tamices.

Número de mallas por pulgada	Ancho de las aberturas		Diámetro de los hilos	
	pulgadas	mm.	pulgadas	c.m.
—	1.050	26.67	0.149	0.378
—	0.742	18.85	0.135	0.343
—	0.525	13.33	0.105	0.267
—	0.371	9.423	0.092	0.234
3	0.263	6.680	0.070	0.178
4	0.185	4.699	0.065	0.165
6	0.131	3.327	0.036	0.091
8	0.093	2.362	0.032	0.081
10	0.065	1.651	0.035	0.089
14	0.046	1.168	0.025	0.063
20	0.0328	0.833	0.0172	0.044
28	0.0232	0.589	0.0125	0.032
35	0.0164	0.417	0.0122	0.031
48	0.0116	0.295	0.0092	0.023
65	0.0082	0.208	0.0072	0.018
100	0.0058	0.147	0.0042	0.011
150	0.0041	0.104	0.0026	0.007
200	0.0029	0.074	0.0021	0.005

Los tamices que incluye el cuadro anterior son, en general, suficientes para todos los ensayos, pues permiten trazar con la exactitud necesaria la curva representativa de un análisis de tamizado, en la que es posible determinar luego, por interpolación, las constantes a que nos referiremos después. Sin embargo, en el caso de que se deseara realizar un ensayo más exacto sobre polvos muy finos, la misma casa Tyler ha preparado otra serie de tamices en los que la separación de los hilos varía $\sqrt[4]{2}$ Estos tamices son los incluídos en el cuadro que sigue.

Número de mallas por pulgada	Ancho de las aberturas		Diámetro de los hilos	
	pulgadas	mm.	pulgadas	c.m.
65	0.0082	0.208	0.0072	0.018
80	0.0069	0.175	0.0056	0.014
100	0.0058	0.147	0.0042	0.011
115	0.0049	0.124	0.0038	0.010
150	0.0041	0.104	0.0026	0.007
170	0.0035	0.088	0.0024	0.006
200	0.0029	0.074	0.0021	0.005

Para la preparación de las arenas destinadas a los ensayos normales de resistencia a la compresión del mortero de cemento portland se emplean, de acuerdo con las normas aprobadas por el Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, los siguientes tamices:

Abertura de mallas	Diámetro de los hilos
mm. 2.380	mm. 0.74 a 1.10
" 1.190	" 0.50 " 0.70
" 0.590	" 0.29 " 0.42
" 0.297	" 0.17 " 0.253
" 0.149	" 0.096 " 0.125

Asimismo, el Instituto Uuruguayo de Normas Técnicas ha aprobado la serie de tamices que se incluyen en el cuadro siguiente:

Designación UNIT Dimensiones nominal del lado de la malla en micrones	Diámetro del alambre en milímetros	Tolerancia en las aberturas	
		Promedio %	Individual máximo %
107 520	5.6 a 9.7	" 4	" 5
90 560	5.3 a 9.3	" 4	" 5
76.160	4.8 a 8.1	" 4	" 5
64 000	4.4 a 7.1	" 4	" 5
53 760	4.1 a 6.2	" 4	" 5
45 280	3.8 a 5.7	" 4	" 5
38 080	3.7 a 5.3	" 4	" 5
32 000	3.5 a 4.8	" 4	" 5
26 880	3.43 a 4.50	" 4	" 6
22 640	3.23 a 4.22	" 5	" 6
19 040	3.10 a 3.91	" 5	" 6
16 000	2.74 a 3.43	" 5	" 6
13 440	2.39 a 3.10	" 5	" 6
11 320	2.23 a 2.84	" 5	" 6
9 520	2.11 a 2.59	" 5	" 6
8 000	1.85 a 2.36	" 5	" 6
6 720	1.60 a 2.11	" 5	" 6
5.660	1.28 a 1.90	" 5	" 10
4 760	1.14 a 1.68	" 5	" 10
4 000	1.00 a 1.47	" 5	" 10
3 360	0.87 a 1.32	" 5	" 10
2 830	0.80 a 1.20	" 5	" 10
2 380	0.74 a 1.10	" 5	" 10
2 000	0.68 a 1.00	" 5	" 10
1 680	0.62 a 0.90	" 5	" 10
1 410	0.56 a 0.80	" 5	" 10
1 190	0.50 a 0.70	" 5	" 10
1.000	0.43 a 0.62	" 5	" 15
840	0.38 a 0.55	" 5	" 15
710	0.33 a 0.48	" 5	" 15
590	0.29 a 0.42	" 5	" 15
500	0.26 a 0.37	" 5	" 15
420	0.23 a 0.33	" 5	" 25
350	0.20 a 0.29	" 5	" 25

Designación UNIT Dimensión nominal del lado de la malla en micrones	Diámetro del alambre en milímetros	Tolerancias en las aberturas	
		Promedio %	Individual máximo %
297	0.170 a 0.253	" 5	" 25
250	0.149 a 0.220	" 5	" 25
210	0.130 a 0.187	" 5	" 25
177	0.114 a 0.154	" 6	" 40
149	0.096 a 0.125	" 6	" 40
125	0.079 a 0.103	" 6	" 40
105	0.063 a 0.087	" 6	" 40
88	0.054 a 0.073	" 6	" 40
74	0.045 a 0.061	" 7	" 60
62	0.039 a 0.052	" 7	" 90
53	0.035 a 0.046	" 7	" 90
44	0.031 a 0.040	" 7	" 90
37	0.023 a 0.035	" 7	" 90

Antes de poner en uso un tamiz es indispensable que se verifique cuidadosamente el número de mallas y los diámetros de los hilos. El tamizado se puede hacer a mano o con una máquina. En el primer caso se considera terminada la operación sobre cada tamiz, cuando la cantidad de polvo que lo atraviesa después de un cierto número de sacudidas no excede de un límite fijado de antemano. En el segundo caso se fija generalmente el tiempo durante el cual se hará funcionar la máquina. Se han establecido convencionalmente estas reglas, porque no es posible determinar con una exactitud rigurosa el total de granos retenidos sobre cada tamiz, principalmente cuando se trata de los tamices de pequeñas aberturas. En efecto, a consecuencia de la trepidación producida por las sacudidas dadas al tamiz, los granos tienden a separar los hilos, aumentando de este modo el ancho de la abertura. Por consiguiente continuará pasando constantemente el polvo a través del tamiz.

Es preferible que el tamizado se haga con ayuda de una máquina, pues es muy difícil obtener a mano resultados bien concordantes. Deberá establecerse un tipo de máquina simple, robusta, que permita dar al tamiz un número de sacudidas determinado en un tiempo dado. (Congreso de Bruxelas — 1906).

El aparato generalmente usado y que llena debidamente estas exigencias es el "Rot-tap". Consiste fundamentalmente en un soporte que puede contener varios tamices superpuestos comunicados entre sí, o independientes. Es posible así efectuar simultáneamente varias determinaciones sobre un mismo o sobre varios materiales.

Las sacudidas de los tamices son producidas por una excéntrica accionada por un motor eléctrico, que mueve también un martillo que golpea periódicamente sobre la tapa que cierra superiormente el conjunto de tamices.

Un aparato de relojería, convenientemente, regulado, corta la corriente y en consecuencia el funcionamiento de la máquina una vez fenecido el plazo fijado para la experiencia.

Entre las determinaciones correspondientes a un ensayo de tamizado puede citarse las siguientes:

Tamaño efectivo: es la separación en milímetros de las mallas de un tamiz que retenga el 90 % del material.

Coeficiente de uniformidad — Es la siguiente relación:

$$\frac{\textit{Separación en mm. del tamiz que retiene el 40 \% del material}}{\textit{Tamaño efectivo}}$$

Módulo de finura (Abrams) — Es el resultado que se obtiene dividiendo por 100 la suma de los porcentajes de material retenido sobre los siguientes tamices Tyler: núm. 100, núm. 48, núm. 28, núm. 14, núm. 8, núm. 4, mm. 9.4 mm., 18.85 y mm. 38.10.

Curva de Fuller — El trazado de las curvas representativas de la composición granulométrica de un agregado permite juzgar por comparación con las llamadas curvas de Fuller las condiciones de los materiales destinados a la construcción de hormigones.

Dichas curvas se refieren a dos ejes coordenados, siendo las abscisas los logaritmos de los anchos de las mallas de la serie de tamices utilizada y las ordenadas los porcentajes de material retenidos sobre cada tamiz.

Según Fuller la composición granolumétrica ideal sería aquella que respondiera a la fórmula:

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

en la que P es el porcentaje en peso del agregado de un diámetro inferior a d, y D el diámetro máximo de los granos que constituyen el agregado. El diámetro d puede tener cualquier valor comprendido entre O y D.

No presenta, generalmente, dificultad práctica la corrección de un agregado cualquiera para ajustar su composición a la determinada por la fórmula de Fuller. No obstante, con los agregados que cumplen las curvas de Fuller se obtienen muchas veces hormigones de poca plasticidad. Por este motivo se han propuesto modificaciones a su fórmula.

Rõs propuso la que se indica a continuación, determinada en el Laboratirio Federal de Ensayo de Materiales de Zurich.

$$P = 50 \left(\frac{d}{D} + \sqrt{\frac{d}{D}} \right)$$

Bolomey indicó a su vez la siguiente:

$$P = B + \left(100 - B \right) \sqrt{\frac{d}{D}}$$

en la que P es el peso de la mezcla (agregado + cemento) de un diámetro inferior a d, en milímetros. B. es una constante que varía con la naturaleza de los materiales y la consistencia. Los valores son:

	Cantos rodados	*Piedra partida*
Para hormigón plástico	$B = 10$	$B = 14$
" " líquido	$B = 12$	$B = 12$

De estos valores de B se deduce que el hormigón líquido requiere más elementos finos que el plástico, y que la piedra partida más que el canto rodado.

En algunos casos, principalmente cuando se trata de materiales cuyos granos son de dimensiones relativamente grandes — por ejemplo superiores a un centímetro — se puede utilizar para el ensayo granulométrico chapas perforadas con agujeros circulares.

Entre los aparatos basados en la acción de corrientes de aire, uno de los más empleados es el de Gary Lindner. Consiste (fig. 52) en tres tubos de vidrio *a*, comunicados entre sí y terminados inferiormenmente en unas tolvas de vidrio I, II y III, que se unen más abajo por medio de tubos de caucho. A estos tubos están unidos otros más peque-

ños que penetran hasta las proximidades del fondo y que sirven para la entrada del aire.

Para efectuar el ensayo se coloca en la primera tolva I, veinte gramos de polvo previamente desecado y enseguida se introduce aire, a la presión de 100 mm. de altura, de agua. La presión del aire puede graduarse con la llave de que está provista cada una de las tolvas, y se lee en un manómetro al aire libre *C*. Las tres tolvas son puestas en ser-

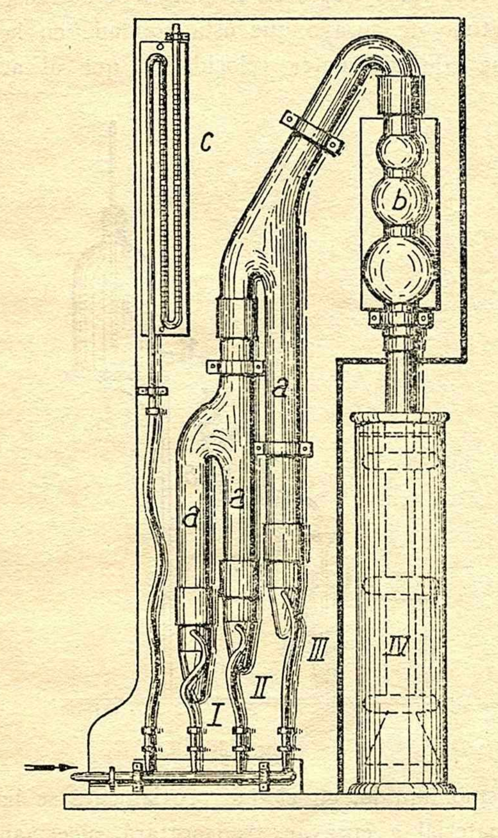


Fig. 52

vicio sucesivamente. En cada una de ellas quedará al fin de la experiencia una parte del polvo, mientras que la otra parte más tenue será evacuada por la extremidad del tercer tubo de vidrio y recogida en el recipiente IV.

Cuando se utiliza un inyector de agua para obtener el aire a presión, éste debe ser desecado antes de su entrada a las tolvas. A tal efec-

to se interpone en su recorrido un frasco de Woolf con ácido sulfúrico. Con este aparato puede, en pocos minutos, fraccionarse el polvo a ensayar en cuatro lotes constituídos por granos de diferente grosor. Hay que tener presente, no obstante, que si se trata de materias poco homogéneas la separación no se hace exclusivamente según el volumen de los granos, pues influirá también sobre los resultados las diferentes densidades de los componentes del polvo.

En otros casos, por ejemplo en el ensayo de arcillas, se sigue generalmente un método de ensayo que está fundado en la acción de corrientes de agua con diferentes velocidades, que al actuar sobre un

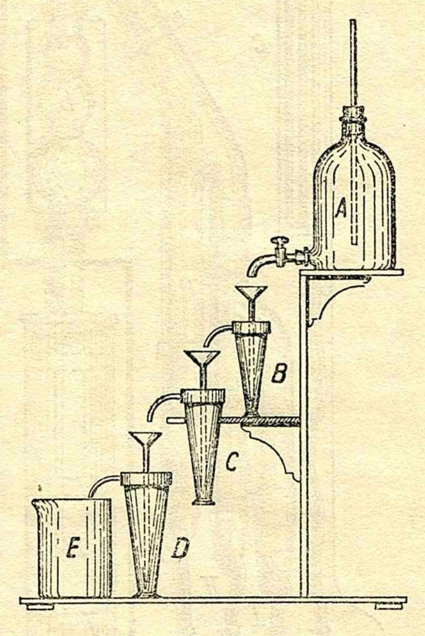


Fig. 53

volumen del mismo líquido, en el que previamente se habrá puesto en suspensión el material a ensayar, transportará sucesivamente sus granos según sus dimensiones o densidades, permitiendo de este modo clasificarlo en varios lotes. Los aparatos más usados para ejecutar ensayos de acuerdo con este método son el de Schultze y el de Schöne.

El aparato de Schlutze (fig. 53) está constituído por tres vasos de forma cónica y de volumen diferente, sobre cuyos bordes están fijados unos anillos metálicos provistos de un tubo de salida.

En cada uno de los vasos hay también un embudo cuyo tubo in-

ferior llega hasta algunos milímerros sobre el fondo del vaso. Los tres vasos están colocados a diferente nivel y en forma tal que el tubo de salida de cada uno queda exactamente sobre el embudo del siguiente.

Para efectuar un ensayo se toma veinte gramos del material pesado en estado seco. Se le mezcla enseguida con un volumen de unos cien centímetros cúbicos de agua. Se hace hervir la mezcla durante algunos minutos, reemplazando el agua evaporada y una vez que todo el material se halla bien disgregado y en suspensión se le introduce en el más pequeño de los tres frascos que es el que ocupa la posición superior. Por medio de un frasco de Mariotte se hace caer el agua en el embudo del vaso superior, con una velocidad tal que en este embudo el nivel del agua se mantenga constante. La velocidad será, por consíguiente, máxima en el vaso superior y mínima en el vaso inferior, que es de mayor capacidad. En estas condiciones se depositará en cada uno de los vasos productos de grosor decreciente y la parte más fina será recogida en un recipiente de mucha mayor capacidad, colocado a continuación del último vaso. Se considera terminada la operación cuando el agua sale de éste completamente clara.

Se procede entonces a recoger, previa decantación, la materia contenida en cada uno de los vasos y en el último recipiente. Se clasificará así el material en cuatro partes que, en el caso de las arcillas, serán: arcilla, arcilla arenosa, arena muy fina y arena fina.

Los resultados obtenidos son en general suficientes para las necesidades industriales, pero cuando se desea resultados más precisos se puede emplear el aparato Schöne, que permite medir además la velocidad de las corrientes de agua. Consiste este aparato (fig. 54) en un recipiente de vidrio cuya parte superior, de forma perfectamente cilíndrica, se prolonga inferiormente por un cono muy alargado que termina en un tubo doblado en U que se prolonga verticalmente hacia arriba.

Encima de la parte cilíndrica el aparato se estrecha hasta formar un cuello que recibe un tapón de caucho *a*, atravesado por un tubo piezométrico que permite medir la velocidad de la corriente de agua.

Este tubo está encorvado dos veces a 45°; en la parte inferior de la segunda curva hay un orificio de salida *c*, de mm. 1.5 de diámetro. La velocidad del agua se determina por la altura de la columna de agua en el tubo piezométrico.

Para efectuar los ensayos se emplea veinte gramos del polvo, pasado previamente por el tamiz de 900 mallas por centímetro cuadrado.

Se pone este material en suspensión en un volumen de unos cien centímetros cúbicos de agua. Enseguida se hace hervir la mezcla agitándodola con una varilla de vidrio hasta obtener la completa disgregación de todas las partículos del material. Se deja enfriar y se vierte luego en el interior del aparato Schöne. Se inicia entonces la experiencia abriendo a tal efecto, la llave que da entrada al agua. Se establecerá así una corriente de agua, de abajo hacia arriba, que transportará los granos más finos, entrará al tubo piezométrico y saldrá por el orificio de salida *c* para ser recogido en un recipiente. Al mismo tiempo se cuidará — regulando convenientemente la llave — que la altura en el tu-

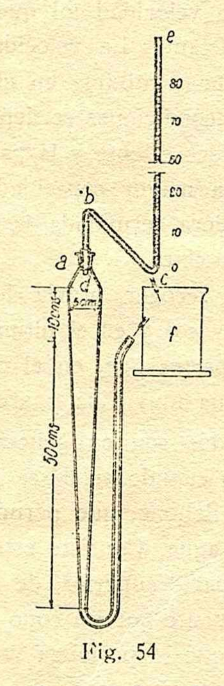


Fig. 54

bo piezométrico sea la que corresponda a la velocidad con que se desea operar. Se seguirá así, hasta que el agua salga completamente clara Cuando esto ocurra se aumentará la velocidad y se sustituirá el recipiente destinado a recoger el agua que sale por *c*.

Se admite, en el ensayo de arcillas, que la clasificacióna de las dimensiones de los granos, según la distintas velocidades, es la siguiente:

1.°) Arcilla; es la parte llevada por la corriente cuya velocidad es de mm. 0.2 por segundo; el grosor máximo de los granos será inferior a mm. 0.01.

2.°) Arcilla arenosa; es la parte conducida por una corriente de mm. 0.7 por segundo; el grosor máximo de los granos será inferior a mm. 0.025.

3.°) Arena pulverulenta; es la parte transportada por una corriente de mm. 1.5 por segundo; el grosor de los granos será inferior a mm. 0.04.

4.°) Arena fina; es la parte que quedará en el aparato; el grosor de sus granos variará entre mm. 0.04 y mm. 0.2.

La determinación de las alturas de agua en el tubo piezométrico, correspondientes a las diferentes velocidades, se puede hacer por cálculo o en forma experimental.

En los aparatos de Schultze y de Schöne — como en el de Gary Lindner — la separación de los gramos no se hace exclusivamente según el grosor de los granos sino también según sus densidades. No obstante, los resultados obtenidos permiten apreciar con la aproximación suficiente, la calidad de la arcilas destinadas a la fabricación de alfarería fina. Ofrecen también un medio rápido para comprobar la identidad de las distintas capas de un yacimiento o de las diferentes partidas cuando hay que proceder a la recepción de cantidades importantes de material.

Porosidad — Llamamos porosidad a la propiedad que tienen muchos materiales de presentar huecos, vacíos o poros entre sus partículas constitutivas.

Se denomina *grado de porosidad absoluta* a la relación:

$$G_{pa} = \frac{p - d}{p}$$

G_{pa} es el grado de porosidad abosoluta, p. el peso específico y d la densidad aparente.

Es evidente que en el caso de los cuerpos absolutamente compactos, en los que la porosidad es nula, el grado de porosidad absoluta será igual a cero, lo que, por lo demás, resulta haciendo $p = d$ en la fórmula precedente.

Denominaremos *grado de porosidad relativa* a la relación entre el volumen de vacíos que es posible llenar experimentalmente con agua y el volumen aparente del material.

Si designamos por V el volumen aparente del material y por v el

volumen lleno; el volumen de los vacíos será $V - v$, y el grado de porosidad relativa estará determinado por la relación:

$$G_{pr} = \frac{V - v}{V}$$

Medida de v — El mejor método para obtener esta medida consiste en aplicar el principio de Arquímedes. Si P es el peso del cuerpo seco, en el aire, y p el peso del mismo impregnado de agua y pesado en el agua, la diferencia $P - p$ corresponderá al volumen del lleno v. El problema se reduce pues a encontrar los valores de P y de p.

Determinación de P — Se empieza por secar perfectamente el cuerpo en una estufa de temperatura constante — generalmente a 105°C — a fin de eliminar toda el agua que pudiera hallarse contenida entre sus partículas. La operación se considera terminada cuando se obtiene el mismo resultado en dos pesadas consecutivas, las que deben hacerse a intervalos iguales.

Determinación de p — Para conseguir la imbibición total puede seguirse tres procedimientos: la simple inmersión, el vacío y el agua en ebullición.

La simple inmersión no dá generalmente resultados satisfactorios. El aire no es expulsado sino en forma muy imperfecta. No obstante, puede obtenerse alguna mejora en los resultados aumentando la profundidad a que se sumerge el cuerpo, renovando el agua con frecuencia y extendiendo lo más posible la duración del ensayo. Es conveniente también que el cuerpo sea sumergido progresivamente, para facilitar así la expulsión del aire.

Los inconvenientes anotados tienen en la práctica una importancia que es lo bastante grande como para descartar el empleo de este procedimiento.

La utilización del vacío permite llegar rápidamente a una eliminación casi completa del aire contenido en el interior del cuerpo. Se realiza el ensayo en la siguiente forma. Se coloca el ejemplar de ensayo dentro de un recipiente de cierre hermético y se produce el vacío a menos de cinco centímetros de mercurio de presión. Se mantiene este vacío durante un cuarto de hora, al cabo del cual se hace entrar en el recipiente la cantidad de agua necesaria para cubrir totalmente el cuerpo. Enseguida se comprime el agua a la presión de una o dos atmósferas.

La experiencia prueba que la imbibición llega un máximo después de un espacio de tiempo que varía entre algunos minutos y varias horas, según sea la naturaleza del material, pero siempre antes de un día.

La inmersión en agua que es llevada luego al estado de ebullición es un medio también eficaz para obtener la imbibición. Ofrece la ventaja de ser más fácil su ejecución que el procedimiento de vacío, pero presenta el inconveniente de no ser aplicable a los cuerpos que sufren un principio de descomposición a la temperatura de 100°C. Los ejemplaplares deben ser sumergidos progresivamente antes de iniciar el calentamiento del agua con el objeto de evitar que la parte interna pueda quedar en estado seo, dificultando la entrada del agua.

Es necesario también, para evitar la producción de deformaciones, que se eleve gradualmente la temperatura del agua y que se prolongue la ebullición durante unos sesenta minutos. Los ejemplares deben permanecer sumergidos hasta el total enfriamiento del agua. Se evita así que la condensación de una parte del vapor de agua, contenido en el interior del cuerpo, produzca un vacío que sería llenado con aire.

La imbibición parece llegar a su máximo si se deja el cuerpo en el agua hasta veinticuatro horas después de terminado el período de ebullición.

Finalmente, una vez obtenida la imbibición por cualquiera de estos medios, sólo resta pesar el cuerpo en el agua y el resultado obtenido será el valor de p, necesario para la determinación del lleno.

Medida de V — Este volumen puede ser determinado, sin dificultad, cuando se dispone de ejemplares de forma geométrica regular. Es suficiente, en general, apreciar las dimensiones con la aproximación del 1/10 de milímetro, siempre que el ejemplar no sea demasiado pequeño. Los ejemplares cúbicos o cilíndricos preparados para los ensayos mecánicos pueden ser utilizados ventajosamente.

Cuando no se dispusiera de trozos de forma geométrica puede determinarse el volumen con la balanza hidrostática o preferentemente con el volumenómetro de Breuil, tal como se ha indicado al tratar lo relativo a la determinación de la densidad aparente. Cuando se emplea la balanza hidrostática puede ser conveniente operar sobre el cuerpo en estado de imbibición.

Permeabilidad — Permeabilidad es la propiedad que tienen algunos materiales de permitir el paso de fluídos; líquidos o gases, a través de su masa.

La porosidad influye sobre la permeabilidad pero no existe proporcionalidad entre ambas propiedades. Dos cuerpos de la misma porosidad pueden tener un grado muy diferente de permeabilidad. Ello depende del número, tamaño y distribución de los poros. Los poros grandes facilitan en general el paso de los gases. En cambio los poros pequeños pero muy numerosos oponen una mayor resistencia al paso de los gases, pero por la acción de la capilaridad pueden dejar pasar más fácilmente los líquidos.

Se expresa el *grado de permeabilidad* de un material indicando el volumen de líquidos o gases que lo hayan atravesado por una superficie de forma y dimensiones determinadas en la unidad de tiempo y bajo una presión dada.

Permeabilidad a los líquidos — El líquido que se utiliza corrientemente en los ensayos es el agua. La forma más conveniente para los ejemplares es la de un disco o cilindro de pequeña altura. El líquido bajo presión es dirigido paralelamente al eje del ejemplar. No obstante, en algunas circunstancia se utilizan ejemplares de forma cúbica. Esta forma presenta el inconveniente de que los distintos puntos de la superficie se encuentran a distancias desiguales del eje, según el cual debe colocarse el tubo de conducción del agua; ofrecen en cambio la ventaja de que son más fáciles de tallar las formas cúbicas o prismáticas, factor que es preciso tener en cuenta cuando se trata de piedras duras, de hormigones o de morteros de cemento portland ya muy endurecidos, etc.

Uno de los dispositivos empleados para los ensayos de permeabilidad es el siguiente: Se acopla a una de las caras del cubo o de las bases del cilindro un tubo graduado de vidrio, de unos tres centímetros de diámetro y de cincuenta centímetros de altura. Para hacer estanca la unión puede emplearse un mortero rico de cemento portland y arena. La superficie del cuerpo debe hallarse perfectamente limpia. El tubo debe quedar en posición vertical. Se vierte enseguida en su interior agua hasta una altura determinada, según las condiciones de la experiencia y la naturaleza del material. Es preciso operar sobre cuerpos en estado de imbibición total, que deben ser mantenidos durante la ejecución del ensayo sumergidos en un recipiente con agua cuyo nivel debe coincidir con el de la base superior del ejemplar. De otra manera los resultados del ensayo podrían hallarse influídos por la capilaridad y por la evaporación superficial en la superficie del cuerpo.

El resultado del ensayo, realizado en las condiciones antedichas, se expresa indicando el volumen de agua que hubiera atravesado la masa del cuerpo en la unidad de tiempo, el que puede leerse fácilmente en el tubo graduado.

Cuando quiere someterse el cuerpo a presiones superiores a 0.05 kg./cm² se une el extremo superior del tubo de vidrio, por medio de un tubo de caucho, con un recipiente que se coloca a la altura deseada. También puede comunicarse el tubo de caucho con una bomba impelente provista de un manómetro, generalmente de mercurio, para medir las presiones.

Puede usarse con muy buenos resultados el aparato Tejmajer (fig. 55), en el cual el ejemplar de ensayo está colocado a manera de diafragma en el interior de una caja de fundición que quedará así dividida

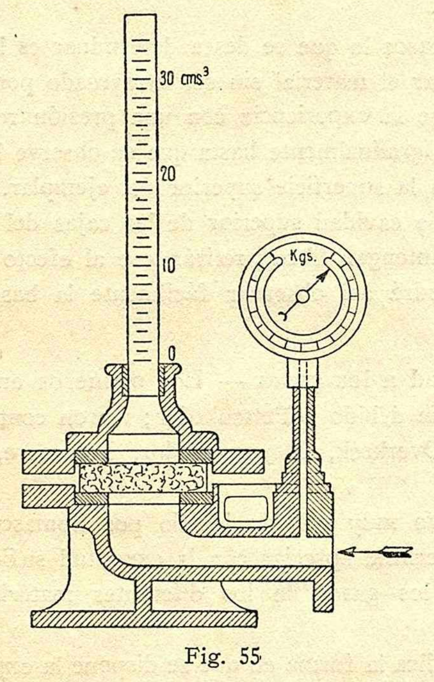


Fig. 55

en dos partes. Por la parte inferior llega el agua impulsada por una bomba con manómetro. El agua tiende a atravesar el cuerpo, a llenar la cavidad superior y a ascender por un tubo graduado. Leyendo en este tubo el nivel del agua al principio y al fin de la experiencia se tendrá, por diferencia, la cantidad de agua filtrada a través del cuerpo durante un plazo fijado de antemano.

En el Instituto de Ensayo de Materiales se ha construído un aparato, basado en el mismo principio que el aparato Tetmajer, para la ejecución simultánea de seis ensayos.

En los ensayos de permeabilidad, sea cual fuere el procedimiento o aparato que se use, no debe anotarse resultados mientras no sea normal el régimen que se establecera al someter el cuerpo a la acción de la corriente de agua.

Para abreviar la duración del ensayo conviene operar siempre sobre cuerpos que se hallen en el estado de imbibición total. Se consigue así regularizar el régimen casi desde el principio de la experiencia.

Es útil que se use agua destilada, para evitar que las impurezas que pudiera contener el agua corriente lleguen al cabo de un cierto tiempo a producir la oclusión de los poros y por consiguiente a impermeabilizar el material.

En algunos casos lo que se desea determinar es la presión máxima que puede soportar el material sin ser atravesado por el agua. En este caso debe iniciarse la experiencia con una presión relativamente débil, que se aumentará gradualmente hasta que se observe la aparición de las primeras gotas en la superficie superior del ejemplar. Para este ensayo es necesario que la cavidad superior de las cajas del aparato Tetmajer y similares se mantengan libres, retirándose al efecto las tapas y tubos graduados. Se podrá así observar fácilmente la base superior de los ejemplares.

Permeabilidad a los gases — Los primeros ensayos efectuados a este respecto son debido a Pettenkofer; fueron continuados luego por Marker, Lang, Overkeck, Meyer, Fodor, Poincarre, Layet, Hudelot, Somasco, etc.

Un dispositivo muy sencillo ideado por Somasco, que describiremos enseguida, permite apreciar con la exactitud suficiente el grado de permeabilidad a los gases de los diferentes materiales generalmente usados.

La fig. 56 indica la forma en que se dispone la experiencia. Somasco fijó como unidad de superficie de trasmisión: un círculo de diez centímetros de diámetro; por unidad de volumen del gas que debe atravesar el cuerpo: diez decímetros cúbicos; y por base de medida: el tiempo necesario, en segundos, para que dichos diez litros de gas pasen a través de un ejemplar cilíndrico impermeabilizado en su superficie lateral y permeable en las dos bases, preparado con el material que se trate de

ensayar. La experiencia se efectúa bajo presiones constante previamente establecidas.

Las partes constitutivas del dispositivo Somasco son las siguientes:

A — Ejemplar cilíndrico fabricado con el material a ensayar. Debe medir exactamente diez centímetros de diámetro y una altura variable según la experiencia y el material de que se trate. Este cuerpo se hallará perfectamente revestido en toda su superficie cilíndrica con una

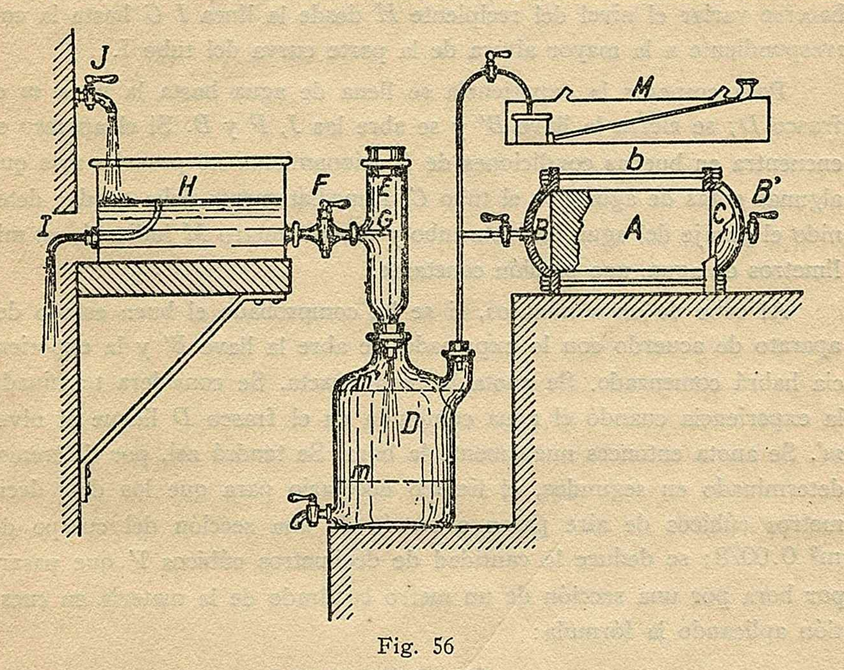


Fig. 56

pintura impermeable obtenida, sea con colodión o con tres o más capas superpuestas de aceite de lino cocido. Las dos bases deben ser, por lo contrario, prolijamente limpiadas antes de cada experiencia.

B, C — Dos casquetes semiesféricos de hierro, reunidos entre sí por medio de bulones de presión *b*. Los dos casquetes cubren las bases del ejemplar cilíndrico *A*, con el que se unen por medio de una pequeña cantidad de pasta de cerusa. Ambos casquetes serán impermeabilizados también mediante una cocción en aceite de lino. Cada uno de ellos está atravesado por un tubo provisto de una llave *B'*, *B'*.

D — Frasco de vidrio cuyo volumen entre las líneas m, m' es exactamente de diez decímetros cúbicos.

E — Prolongación del frasco *D*.

H — Recipiente con agua, alimentado con exceso por la llave J; el excedente de agua se elimina por el tubo acodado *I*, de un gasto mamayor que la llave *J*.

Los tubos *I* y *G* se hallan al mismo nivel. El tubo *I* debe poder girar, de modo que su parte curva pueda ocupar todas las posiciones alrededor de un centro situado sobre la línea *I G*; de esto modo puede hacerse variar el nivel del recipiente *H* desde la línea *I G* hasta la correspondiente a la mayor altura de la parte curva del tubo I.

Para empezar la experiencia se llena de agua hasta la línea *m* el frasco *D*; se cierra la llave *B'* y se abre las *J*, *F* y *B*. Si el aparato se encuentra en buenas condiciones de funcionamiento no pasarán más que algunas gotas de agua por el tubo *C*. Inmediatamente debe quedar detenido el pasaje del agua por este tubo y el manómetro *M* indicará, en milímetros de agua, una presión constante.

Al cabo de unos minutos, si se ha comprobado el buen estado del aparato de acuerdo con lo expresado, se abre la llave *B'* y la experiencia habrá comenzado. Se anota la hora exacta. Se considera terminada la experiencia cuando el agua contenida en el frasco *D* llegue al nivel *m'*. Se anota entonces nuevamente la hora. Se tendrá así, por diferenia, determinado en segundos, el tiempo necesario para que los diez decímetros cúbicos de aire pasen a través de una sección del cuerpo de m^2 0.0078; se deduce la cantidad de decímetros cúbicos *V* que pasará por hora por una sección de un metro cuadrado de la materia en cuestión aplicando la fórmula:

$$V = \frac{10 \times 3600 \times 10000}{78\, n}$$

n es el número de segundos resultantes de la experiencia.

Somasco dedujo — después de haber efectuado un gran número de ensayos — las siguientes conclusiones:

a) — La cantidad de aire que pasa es sensiblemente proporcional a la presión.

b) — Dicha cantidad de aire no es inversamente proporcional al espesor.

c) — La cantidad de aire que pasa es constante tanto al fin como al principio de la experiencia.

Higroscopicidad — Se da este nombre a la propiedad que tienen algunos materiales de absorber por capilaridad el agua puesta en contacto con sus superficies.

Coeficiente de higroscopicidad es el peso de agua absorbido durante el primer minuto por un prisma rectangular, cuya base de un decímetro cuadrado es puesta en contacto con la superficie del agua contenida en un recipiente cuyo nivel es mantenido constante.

Los primeros trabajos con respecto a esta propiedad de los materiales fueron hechos por Poincare.

Cordeau, que efectuó también una gran cantidad de experiencias sobre piedras naturales y artificiales, determinó algunas conclusiones de carácter general que figuran en un trabajo que presentó en 1894 a la Comisión Francesa de Métodos de Ensayo de Materiales de Construcción. Las principales de esas conclusiones son las siguientes:

1.° — Cuando se sumerge en agua una piedra de constitución homogénea, el líquido asciende poco a poco a alturas que son proporcionales a la raíz cuadrada de los tiempos; la línea de separación entre la parte seca y la mojada permanece constantemente horizontal.

2.° — No ejercen influencia sobre la marcha del fenómeno la forma y las dimensiones de la sección mojada ni la altura del ejemplar.

3.° — Mientras el ejemplar no se encuentra mojado en toda su altura la cantidad de agua absorbida es proporcional a la altura de la parte mojada.

4.° — A partir del instante en que la piedra se encuentra mojada, en toda su altura, continúa absorbiendo una cantidad de agua proporcional a su volumen. El tiempo que demora en absorber esa cantidad suplementaria de agua es equivalente al que necesitaría otro prisma de la misma sección, pero de mayor altura que el primero, puesto simultáneamente con este, en contacto con el agua para absorber un volumen de agua igual a dicha cantidad suplementaria.

5.° — Las diferentes secciones del cuerpo absorben cantidades de agua que siguen una progresión decreciente de abajo a arriba.

6.° — Si de tiempo en tiempo se interrumpe la experiencia se observa, por este hecho, retardos apreciables en la marcha del fenómeno.

7.° — Una solución de continuidad horizontal u oblicua, aunque sea muy pequeña, retarda la subida del agua, tanto más cuanto mayor sea la parte de sección transversal abarcada. Una grieta vertical ancha pro-

duce los mismos efectos, pero si es lo bastante estrecha para constituir un conducto capilar, activa la marcha ascendente del agua. En estos casos la línea de separación entre la parte seca y la mojada deja de ser horizontal al principio de la grieta pero tiende a serlo una vez superada ésta.

8.° — La evaporación superficial retarda el ascenso del agua y si es muy intensa puede detenerlo completamente.

9.° — Si se impermeabiliza las caras laterales del ejemplar el ascenso del agua resulta retardado. Sin embargo, la cantidad total de agua absorbida por la piedra tanto en este caso como en el anterior, cuando llega a estar totalmente mojada, es la misma que en el caso ordinario.

10° — Una piedra húmeda absorbe una cantidad determinada de agua, en igual tiempo que la misma piedra, seca, requeriría para absorber la misma cantidad de agua, si anteriormente a la experiencia se le hubiera hecho absorber par capilaridad una cantidad de agua igual a la que contenía entre sus partículas cuando se encontraba en estado húmedo.

11.° — Si la piedra descansa sobre una base de arena, la marcha del fenómeno es más lenta. El retardo resulta tanto mayor y la cantidad de agua absorbida tanto menor cuanto menos mojada esté la arena.

12.° — La subida del agua es más lenta cuando la piedra se coloca con su lecho de cantera en posición horizontal que cuando este ocupa la posición vertical.

13.° — Si el agua discurre a lo largo de una de las caras verticales del ejemplar el fenómeno se produce en el sentido horizontal y es tanto más lento cuanto menor es la cantidad de agua puesta en contacto con la piedra. Las cantidades de agua absorbida son las mismas que en el caso anterior. El plano de separación entre la parte seca y la mojada es oblicuo; el agua avanza más rápidamente en la parte inferior que en la superior; la oblicuidad resulta tanto más acentuada cuanto más lento es el desarrollo del fenómeno.

Heladicidad — Bajo esta denominación se estudian todos los efectos producidos en un cuerpo cuando, a consecuencia ee un descenso suficiente de temperatura se produce la congelación del agua contenida, accidental o permanentemente, en el interior de sus poros.

El aumento de volumen experimentado por esa cantidad de agua

puede desarrollar en el interior del cuerpo una serie de esfuerzos que producirán los efectos consiguientes. En ciertos casos pueden ocasionar la rotura o la desintegración del material.

El estudio de la heladicidad tiene especial interés en cuanto se refiere a las piedras naturales y artificiales, a los morteros, etc.

Uno de los primeros métodos de ensayo, adoptados con el fin de estudiar prácticamente la heladicidad fué propuesto por Brard. Esta fundado en que una solución salina al cristalizar produce efectos semejantes al del agua que se hiela.

Se ejecuta el ensayo sumergiendo un ejemplar del material en estudio, que debe ,en lo posible, estar terminado por aristas vivas, en una solución saturada de sulfato sódico. El ejemplar debe permanecer allí durante el tiempo que sea preciso para obtener su imbibición; generalmente son suficientes unas cinco horas. Después se le saca del líquido y se le opone a la acción de una corriente de aire a la temperatura de 15°C. La evaporación del agua hará cristalizar una parte de la sal contenida en el interior del cuerpo. Se lava entonces el ejemplar con agua destilada, la que arrastrará conjuntamente con los cristales formados, los trozos que se hubieran desprendido del cuerpo. Se repite esta operación unas veinticinco veces.

La relación entre el peso primitivo del ejemplar y el del mismo después de realizado el ensayo expresa el *grado de heladicidad.*

Este procedimiento presenta el inconveniente de que los efectos producidos por la sal durante su cristalización no son en algunos materiales idénticos a los producidos por la congelación del agua. En algunos casos se han observado en la práctica resultados desfavorables, no obstante haber sido satisfactorio los ensayos efectuados. El caso inverso puede presentarse también.

Por esta razon se prefiere en la actualidad someter el material a temperaturas lo suficientemente bajas para producir la congelación del agua contenida en su interior. Este procedimiento fué aplicado por Blümcke antes de 1885, quien operaba sobre ejemplares cúbicos de unos siete centímetros de lado, que después de pesados en estado seco eran puestos al máximo grado de imbibición para ser enseguidas llevados a la temperatura de —15°C, obtenida con una mezcla refrigerante. El ejemplar era mantenido a esta temperatura durante cinco horas, al cabo de las cuales se le exponía al aire durante media hora para luego sumergirlo en un baño de agua a + 15°C, donde permanecía otras cinco

horas. La operación era repetida veinticinco veces. La disminución de peso experimentada por el ejemplar permitía, como en el caso anterior, calcular el grado de heladicidad. Se completaba el ensayo observando con una lente de suficiente aumento el estado de las caras y aristas, con el objeto de comprobar la existencia de grietas o desprendimientos.

El método de ensayo, adoptado generalmente en la actualidad, es el que se indica a continuación.

Se opera sobre varios ejemplares cúbicos de unos siete centímetros de lado, que son pesados después de haber sido secados a una temperatura de unos 105°C hasta peso constante. Se determina la resistencia a la compresión de la mitad de los ejemplares y se produce en la otra mitad el máximo posible de imbibición utilizando cualquiera de los métodos que hemos indicado anteriormente, pero con preferencia el de vacío. Enseguida se colocan estos ejemplares en una cámara cuya temperatura es de —15°C, donde deben permanecer durante cuatro horas.

Se llevan luego los ejemplares a un baño de agua destilada cuya temperatura será de +15°C, donde se les deja durante dos horas. Esta operación se repite veinticinco veces después de las cuales se vuelven a secar en la estufa para determinar luego si ha habido disminución de peso. Se observa además con una lente el estado de las caras y aristas y se determina enseguida la resistencia a la compresión. La comparación de estos resultados con los obtenidos con el material antes del ensayo permite juzgar la resistencia ofrecida por el material a la acción del hielo.

Braun trató de establecer una fórmula basada en el esfuerzo de expansión del hielo y la elasticidad, la porosidad y la resistencia de cada material, con propósito de fijar un coeficiente numérico, que expresaría el grado de heladicidad. Sin embargo el intento tuvo que ser abandonado porque su aplicación práctica no resultó generalmente satisfactoria.

Apéndice

Instrucciones para la redacción de las monografías correspondientes a los trabajos prácticos del curso de Ensayo de Materiales

Las monografías deben contener los datos que se indican a continuación:

Objeto del ensayo. — Se indicará en forma concisa.

Material ensayado. — Se anotará procedencia, naturaleza, marca, forma de los ejemplares, etc.

Máquinas e instrumentos utilizados. — Se mencionarán en forma sucinta, pero cuando sea preciso se agregarán croquis indicativos.

Métodos de ensayo. — Se detallará el método seguido, describiendo el proceso completo de la experiencia.

Presentación de los resultados. — Los datos observados y los resultados calculados deben ser claramente clasificados, agregando cuadros, diagramas, planillas de cálculos, etc. Cada parte debe llevar su título y será presentada en forma lo suficientemente clara para que no se requiera ninguna explicación verbal ampliatoria.

Conclusiones y discusión de los resultados. — Deberá indicarse el significado de cada determinación y la interpretación de los resultados obtenidos, agregando — cuando corresponda — comentarios respecto a las relaciones existentes entre los diferentes ensayos, como también a las causas posibles de error.

Deberá mencionarse todo incidente, no normal, observado durante las experiencias y sus motivos probables.

Se discutirá la exactitud de los métodos seguidos y el grado de aproximación de los resultados.

Cuando el examen de los datos observados o de los resultados calculados permita vislumbrar la existencia de una ley definida, debe intentarse su determinación o por lo menos indicar un programa de trabajo tendiente a su investigación. No obstante, se recomienda proceder con mucha cautela antes de aventurar opiniones a este respecto.

Plazo para la presentación de las monografías. — Las monografías deberán ser presentadas dentro de los ocho días siguientes a la clase práctica correspondiente. Para la calificación respectiva se tendrá presente lo que establece al respecto el Reglamento General de la Facultad.

INDICE

Págs.

CAPITULO III

ENSAYOS A LA EXTENSION

CAPITULO IV

ENSAYOS A LA COMPRESION

CAPITULO V

ENSAYOS A LA FLEXION

Págs.

CAPITULO VI

ENSAYOS AL CORTE

CAPITULO VII

ENSAYOS A LA TORSION

CAPITULO VIIII

ENSAYOS POR CHOQUE

CAPITULO IX

ENSAYOS DE FATIGA

CAPITULO X

ENSAYOS DE FRAGILIDAD

Ensayos de flexión por choque sobre barras entalladas

Págs.

APENDICE



FE DE ERRATAS

Págs.	línea	dice	debe decir
39	última	$\frac{n}{2}$	$\frac{r\ n}{2}$
63	27	$100\ B$	$100\ \beta$
67	3	$100\ \varphi \sqrt{\omega_o}$	$\frac{100\ \varphi \sqrt{\omega_o}}{d_o}$
67	18	$100 \left(\frac{m - n}{m} \right)$	$100\ \beta \left(\frac{m - n}{m} \right)$
101	última	p	p_1
102	3	p	p_1
108	la fig. 30 está invertida.		
146	5	$\frac{W_2}{2\ f_2}$	$\frac{W_2}{a_2\ f_2}$
146	7	A_1	A
155	13	Domas	Dumas

REFERENCIAS OMITIDAS:

Fig. 32 — Corresponde a ejemplares cilíndricos de cobre de 10 mm. de diámetro y 15 mm. de altura, ensayados en un martinete vertical con una maza de 25 kgs.

Fig. 34 — Corresponde a los siguientes ensayos:

A — Acero: $D = 10$ mm; $r = 1$ mm; $l = 0$.

$R = 42$ Kg/$_{mm^2}$; $A_{11.3} = 30.5\%$; $T_u = 25.1$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 0.74$

B — Latón: $D = 10$ mm; $r = 1$ mm; $l = 0$

R=45.6 Kg/$_{mm^2}$; $A_{11:3} = 20\%$; $T_u = 18$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 0.59$

C — Aluminio: $D = 10$ mm; $r = 1$ mm; $l = 0$

$R = 13.2$ Kg/$_{mm^2}$; $A_{11.3} = 10\%$; $T_u = 2.6$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 1.90$

Fig. 35 — Corresponde a los siguientes ensayos:

A — Acero extra dulce: $D = 10$ mm; $d = 6$ mm.

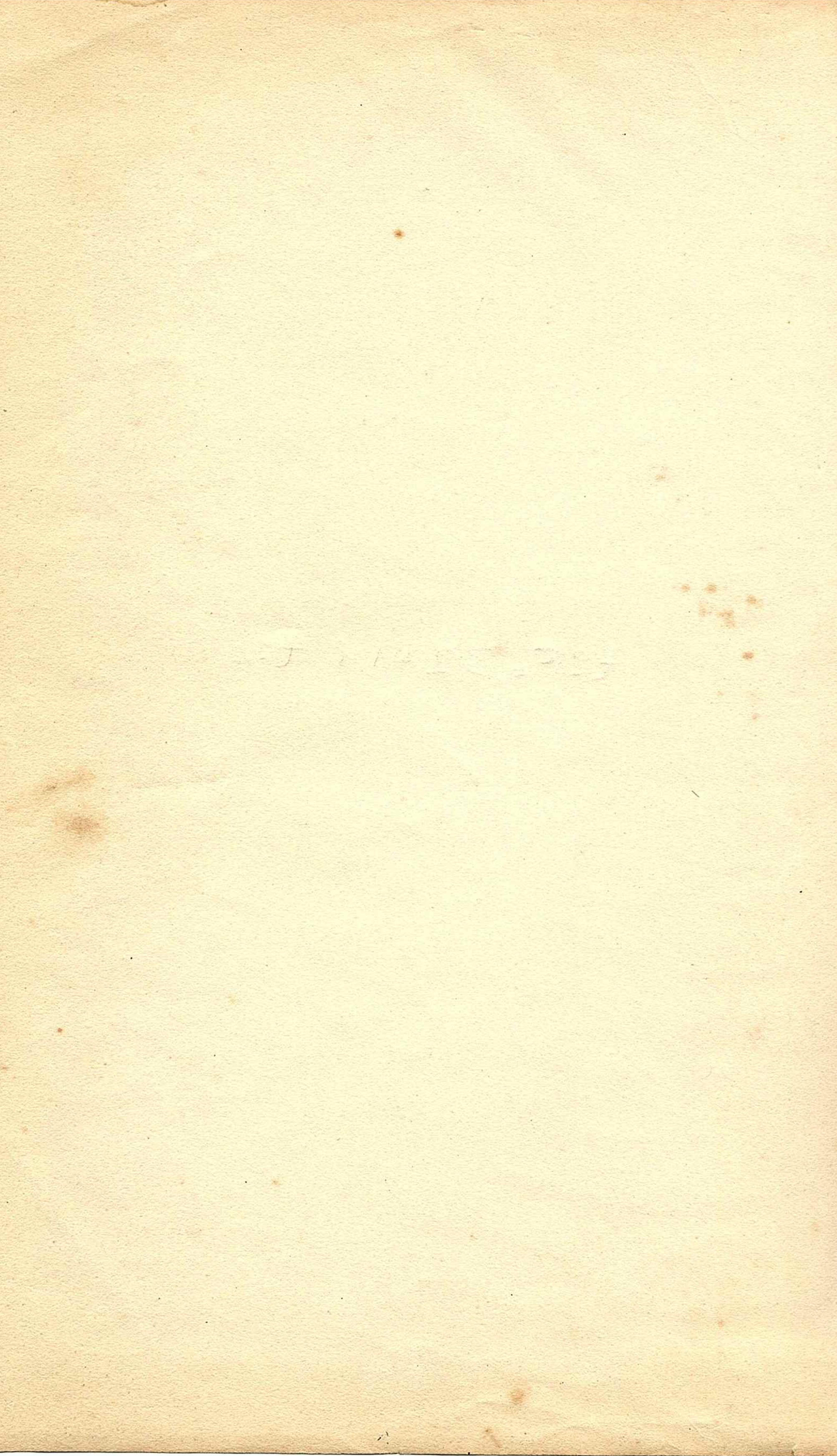
$R = 39.5$ Kg/$_{mm^2}$; $A_{11.3} = 34.5\%$; $T_u = 28.4$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 0.74$

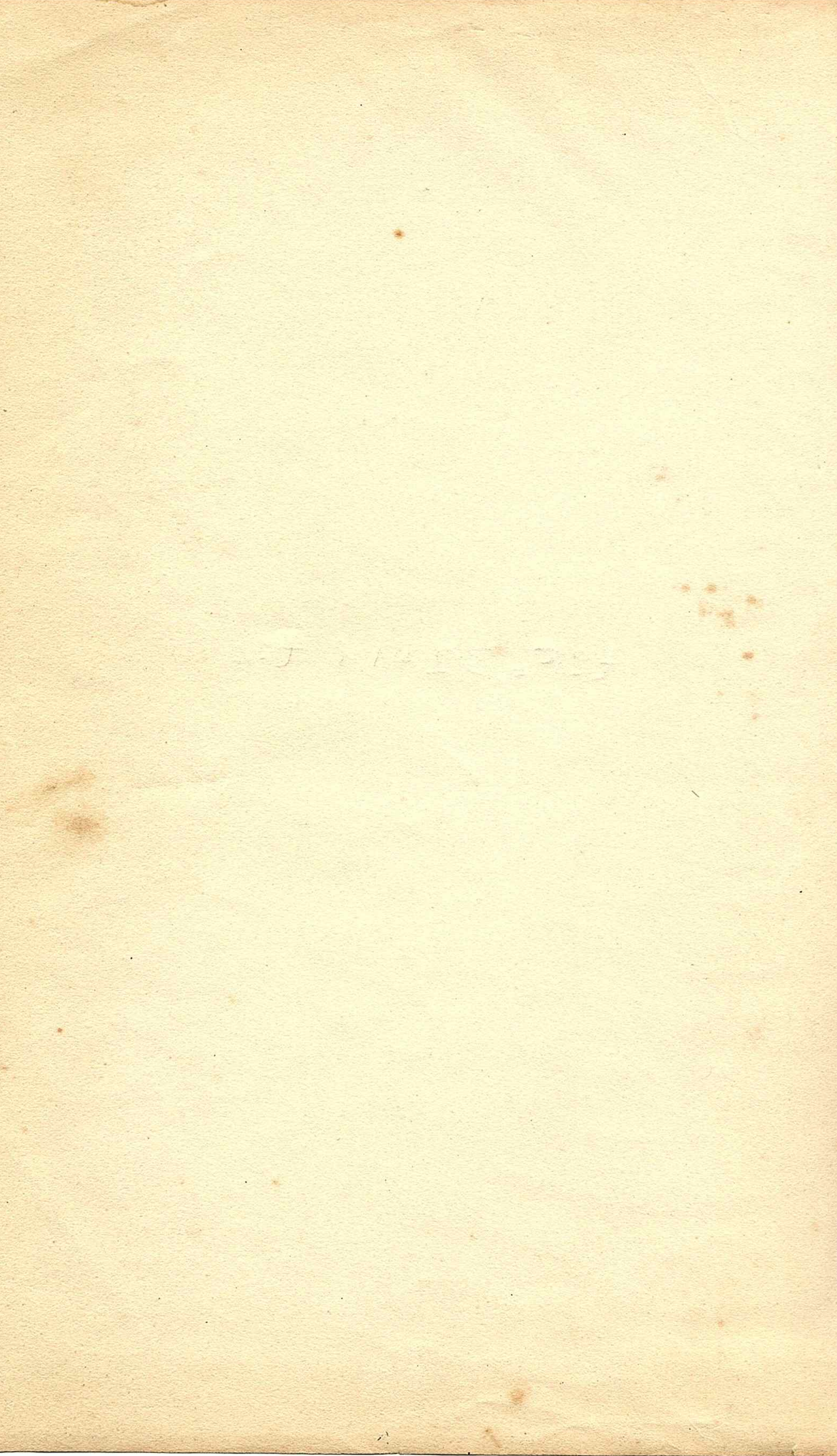
B — Acero semi dulce: $D = 10$ mm; $d = 5$ mm.

$R = 45.2$ Kg/$_{mm^2}$; $A_{11.3} = 29.5\%$; $T_u = 27.3$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 0.74$.

C — Acero dulce: $D = 10$; d = 4.

$R = 40.4$ Kg/$_{mm^2}$; $A_{11.3} = 29.1\%$; $T_u = 27.8$ Kgmm/$_{mm^3}$; $\beta = 0.74$







Talleres Gráficos Milton Reyes y Cía. S. A.